



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TL 141584

ANALISIS PENGARUH VARIASI TEMPERATUR DAN MEDIA PENDINGIN PROSES HARDENING PADA SIFAT KEKERASAN CROSSBAR SEBAGAI SOLUSI KEGAGALAN CROSSBAR PT. SEMEN INDONESIA TBK.

GALE CYNDIE RAKASIWI
NRP. 2713 100 123

Dosen Pembimbing
Ir. Rochman Rochiem, M.Sc.
Alvian Toto Wibisono, ST., MT.

JURUSAN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2017



TUGAS AKHIR - TL141584

**ANALISIS PENGARUH VARIASI TEMPERATUR
DAN MEDIA PENDINGIN PROSES HARDENING
PADA SIFAT KEKERASAN CROSSBAR SEBAGAI
SOLUSI KEGAGALAN CROSSBAR PT. SEMEN
INDONESIA TBK.**

GALE CYNDIE RAKASIWI
NRP. 2713 100 123

Dosen Pembimbing :
Ir. Rochman Rochiem, M.Sc
Alvian Toto Wibisono, ST., MT

JURUSAN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2017

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



FINAL PROJECT - TL141584

**ANALYSIS OF THE EFFECT VARIATIONS IN THE
TEMPERATURE AND COOLING MEDIUM IN
HARDENING PROCESS ON HARDNESS
PROPERTIES OF CROSSBAR AS THE SOLUTION
OF FAILURE CROSSBAR PT. SEMEN INDONESIA
TBK.**

GALE CYNDIE RAKASIWI
NRP. 2713 100 123

Advisor :

Ir. Rochman Rochiem, M.Sc

Alvian Toto Wibisono, ST., MT

MATERIALS AND METALLURGICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya
2017

(this page left intentionally blank)

**ANALISIS PENGARUH VARIASI TEMPERATUR DAN
MEDIA PENDINGIN PROSES *HARDENING* PADA SIFAT
KEKERASAN *CROSSBAR* SEBAGAI SOLUSI
KEGAGALAN *CROSSBAR* PT. SEMEN INDONESIA TBK.**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Mmeperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Teknik Korosi dan Analisa Kegagalan
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

Gale Cyndie Rakasiwi
NRP. 2713 100 123

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Ir. Rochman Rochiem, M.Sc. (Pembimbing I)
2. Alvian Toto Wibisono ST., MT (Pembimbing II)



(halaman ini sengaja dikosongkan)

ANALISIS PENGARUH VARIASI TEMPERATUR DAN MEDIA PENDINGIN PROSES *HARDENING* PADA SIFAT KEKERASAN MATERIAL *CROSSBAR* SEBAGAI SOLUSI KEGAGALAN *CROSSBAR* PT. SEMEN INDONESIA TBK.

Nama Mahasiswa : Gale Cyndie Rakasiwi
NRP : 2713 100 123
Jurusan : Teknik Material dan Metalurgi
Pembimbing : Ir. Rochman Rochiem, M.Sc
Alvian Toto W., ST., MT.

ABSTRAK

Crossbar merupakan bagian dari cooler yang berfungsi sebagai media pendingin dan transport clinker. Pada crossbar terjadi crack pada bagian sayap crossbar sehingga umur pakai tidak sesuai dengan lifetime. Dalam penelitian ini dilakukan analisa kegagalan penyebab terjadinya kegagalan pada crossbar dan solusi agar komponen tidak mudah crack. Pengujian yang dilakukan untuk menganalisa material ini adalah uji komposisi, streomikroskop, SEM, metalografi, dan hardness. Kemudian dilakukan proses hardening pada temperatur 950°C, 900°C, 850°C, dan 800°C dengan waktu tahan 60 menit, yang kemudian di quench dengan media pendingin udara dan oli untuk meningkatkan kekerasannya dan kekuatannya. Kemudian, komponen dilakukan proses tempering pada temperatur 550°C dengan waktu tahan 60 menit untuk mengkondisikan sesuai dengan kinerja crossbar di pabrik, kemudian dilakukan uji hardness, dan metalografi untuk membandingkan pada kondisi awalnya. Hasil percobaan ini diperoleh bahwa kekerasan komponen meningkat dari yang semula 405 BHN menjadi 430-599 BHN. Diperoleh kekerasan yang paling besar pada hardening dengan temperatur 950°C dan pendinginan oli yaitu sebesar 599 BHN.

Kata Kunci : Crossbar, Grey Cast Iron, Hardening, Hardness

(halaman ini sengaja dikosongkan)

**ANALYSIS OF THE EFFECT VARIATIONS IN THE
TEMPERATURE AND COOLING MEDIUM IN
HARDENING PROCESS ON HARDNESS PROPERTIES
OF CROSSBAR AS THE SOLUTION OF FAILURE
CROSSBAR PT. SEMEN INDONESIA TBK.**

Student Name : Gale Cyndie Rakasiwi
Student ID : 2713 100 123
Department : *Materials and Metallurgical Engineering*
Advisor : Ir. Rochman Rochiem, M.Sc
Alvian Toto W., ST., MT.

ABSTRACT

Crossbar is part of the cooler which serves as a cooling medium and transport clinker. At crossbar frequent crossbar crack at the wings and have a short lifespan. In this research, analysis of failure causes of failure on the crossbar and solutions so that the components are not easily crack. Tests were carried out to analyze this material is composition, mikroskop stereo, SEM, metallographic and hardness. Then the hardening process is carried out at a temperature of 950°C, 900°C, 850°C and 800°C with a holding time of 60 minutes, which then quench with air conditioning and oil media to increase hardness and strength. After the hardening, the components are tempered at a temperature of 550°C with a holding time of 60 minutes to condition in accordance with the performance of the crossbar at the factory, then the hardness and metallography to compare to its prior condition. The results of this experiment showed that the hardness value of the component increased from 405 BHN into 430-599 BHN. The maximal hardness value there on hardening with temperature of 950°C and the cooling oil is equal to 599 BHN

Keywords : Crossbar, Grey Cast Iron, Hardening, Hardness

(this page left intentionally blank)

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT, karena berkat rahmat dan hidayah-Nya, tidak lupa shalawat serta salam penulis panjatkan kepada Nabi Muhammad SAW sehingga penulis diberi kesempatan untuk menyelesaikan Tugas Akhir. Tugas Akhir ditujukan untuk memenuhi mata kuliah wajib yang harus diambil oleh mahasiswa Jurusan Teknik Material dan Metalurgi Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), penulis telah menyelesaikan Laporan Tugas Akhir yang berjudul **“Analisis Pengaruh Variasi Temperatur Dan Media Pendingin Proses *Hardening* Pada Sifat Kekerasan Crossbar Sebagai Solusi Kegagalan Crossbar PT. Semen Indonesia Tbk.”**. Penulis ingin berterima kasih juga kepada :

1. Kedua Orang Tua, dan Mbak Wiga, Winda yang telah mendukung secara moril maupun materil serta doa yang selalu dipanjatkan demi kesehatan dan keselamatan anaknya.
2. Bapak Dr. Agung Purniawan, S.T, M.Eng., selaku Ketua Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS.
3. Bapak Ir. Rochman Rochiem M.Sc selaku dosen pembimbing tugas akhir yang telah memberikan bekal yang sangat bermanfaat.
4. Bapak Alvian Toto W, S.T., M.T selaku co dosen Pembimbing yang telah banyak membanyak memberikan ilmu.
5. Dr. Eng. Hosta Ardhyanta ST., M.Sc. selaku Koordinator Tugas Akhir Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS.

6. Bapak Budi Agung Kurniawan S.T., M.Sc selaku dosen wali yang sangat mengayomi
7. Seluruh dosen dan karyawan Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS.
8. Bapak Didiet dan Bapak Ginanjar selaku pembimbing di PT. Semen Indonesia.
9. Rekan-rekan mahasiswa Teknik Material dan Metalurgi angkatan 2013, 2014, dan 2015.
10. Serta seluruh pihak yang belum bisa dituliskan satu per satu oleh penulis. Terimakasih atas dukungan dan bantuan teman-teman sekalian.

Penulis menyadari bahwa dalam pembuatan laporan ini masih terdapat kekurangan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik yang membangun dari pembaca demi perbaikan dan kemajuan bersama. Penulis berharap laporan kerja praktik ini dapat bermanfaat dan dimanfaatkan dengan sebaik-baiknya

Surabaya, 09 Januari 2017
Penulis,

Gale Cyndie Rakasiwi
2713100123

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	v
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL.....	xxi
BAB I PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Batasan Masalah.....	3
1.4. Tujuan Penelitian.....	3
1.5. Manfaat Penelitian.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1. Pengertian Clinker Cooler	5
2.2. Pengertian Crossbar.....	7
2.3. Material Crossbar (ASTM A48).....	8
2.4. Baja AISI D2	9
2.5. Diagram Fase Fe-Fe ₃ C	12
2.6. Diagram Fase Fe – 12% & 18% wt Cr – C	13
2.7. Baja Paduan.....	14
2.7.1. Baja Paduan Tinggi (High Alloy Steel).....	14

2.7.2. Pengaruh terhadap diagram fasa.....	15
2.8. Analisa Kegagalan.....	16
2.8.1. Prosedur Dalam Analisa Kegagalan.....	18
2.9. Patah Getas dan Patah Ulet	19
2.9.1 Patahan Ulet	20
2.10. Mekanisme Pembentukan Patah Lelah.....	23
2.10.1 Tahap Retak Awal (Crack Initiation)	24
2.10.2 Tahap Perambatan Retak (Crack Propagation)	24
2.11. Karakteristik Patahan	25
2.12. Heat Treatment	27
2.12.1. Hardening	28
2.12.2. Austenisasi.....	29
2.12.3. Cooling	30
2.12.4. Tempering	31
2.12.5. Tempering pada Martensite.....	35
2.13. Pengujian Kekerasan	36
2.13.1. Uji Kekerasan Brinnel	37

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Diagram Alir Penelitian.....	39
3.2. Metode Penelitian.....	40
3.3. Material yang digunakan	40
3.3.1. Material	40
3.3.2. Spesimen	41
3.4. Peralatan	42
3.5. Tahapan Penelitian	44

3.5.1. Review Dokumen Perusahaan	44
3.5.2. Preparasi Spesimen.....	44
3.5.3. Uji Komposisi.....	44
3.5.4 Proses Perlakuan Panas	45
3.5.5 Pengamatan Makroskopik dan Mikroskopik.....	45
3.5.6 Pengamatan Mikroskopik.....	46
3.5.7 Uji Kekerasan	47
3.6. Rancangan Penelitian	48
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN	
4.1. Analisa Data Kegagalan Material.....	49
4.1.1. Record Crossbar KJ210 di Clinker Cooler	49
4.1.2. Pengamatan Hasil Makro Pada Crossbar yang Gagal	50
4.1.3. Hasil Streomicroscope Pada Crossbar yang Gagal	51
4.1.4. Hasil Pengujian Scanning Electron Microscope (SEM) Pada Crossbar yang Gagal.....	53
4.1.5. Hasil Pengujian Komposisi Kimia Pada Crossbar yang Gagal.....	55
4.1.6. Hasil Pengujian Metalografi Pada Crossbar yang Gagal	57
4.1.7. Hasil Pengujian Kekerasan pada Crossbar yang Gagal	59
4.2. Hasil Proses Heat Treatment Pada Crossbar yang Gagal	61
4.2.1. Hasil Pengujian Metalografi Pada Crossbar Setelah di Hardening dan Tempering.....	63

4.2.2. Hasil Pengujian Kekerasan Pada Crossbar Setelah di Hardening dan Setelah di Tempering	66
4.2. Pembahasan	69
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1 Kesimpulan.....	77
5.2 Saran.....	78
DAFTAR PUSTAKA	xxiii
LAMPIRAN	xxvii
UCAPAN TERIMAKASIH.....	xxxiii
BIODATA PENULIS	xxxv

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Komponen utama <i>clinker cooler</i>	6
Gambar 2. 2 <i>Cooler</i>	6
Gambar 2. 3 <i>Crossbar</i>	7
Gambar 2. 3 Mekanisme <i>Crossbar</i>	8
Gambar 2. 4 Grafik TTT baja AISI D2.....	11
Gambar 2. 5 Struktur Mikro Baja AISI D2.....	11
Gambar 2. 6 Diagram fase Fe - Fe ₃ C	13
Gambar 2. 7 (A) Diagram fase Baja Chrom pada 12% Cr dan (B) Diagram fase Baja Chrom pada 18% Cr.....	13
Gambar 2. 8 Pengaruh unsur paduan terhadap temperatur eutectoid (kiri) dan kadar dalam eutectoid (kanan).....	15
Gambar 2. 9 Pengaruh kadar chromium terhadap luasan daerah austenite.....	16
Gambar 2. 10 Skematik ciri patah getas dan patah ulet dari diagram tegangan-regangan	20
Gambar 2. 11 (a) bentuk patahan ulet, (b) bentuk patahan ulet setelah terjadi necking, (c) bentuk patahan getas tanpa terjadi deformasi plastis.....	21
Gambar 2. 12 Tahap patahan cup dan cone (a) awal necking, (b) terbentuknya cavity kecil, (c) pengumpulan cavity hingga menjadi retakan, (d) perambatan retak, (e) patahan geser dengan sudut 45° terhadap arah tegangan	21
Gambar 2. 13 (a) patah ulet (cup and cone) pada aluminium, dan (b)patah getas pada mild steel	22
Gambar 2. 14 (a) SEM yang menunjukkan spherical dimple karakteristik, patahan hasil beban tarik uniaxial,	

3300x, dan (b) SEM yang menunjukkan spherical dimple karakteristik hasil beban geser, 5000x	23
Gambar 2. 15 Mekanisme patah lelah dan faktornya	23
Gambar 2. 16 Model Wood untuk pengintian retak	24
Gambar 2. 17 Mekanisme penumpulan ujung retakan secara plastis (a) beban nol (b) beban tarik kecil (c) beban tarik maksimum (d) beban-tekan kecil (e) beban tekan maksimum (f) beban tarik kecil	25
Gambar 2. 18 Foto SEM yang menunjukkan Beachmarks dan striasi secara mikro	26
Gambar 2. 19 Retakan dengan pola rambatan (a) Transgranular (b) Intergranular	27
Gambar 2. 20 Perlakuan panas Hardening-tempering pada baja	28
Gambar 2. 21 Rentang temperatur austenitisasi pada perlakuan panas	29
Gambar 2. 22 Tiga tahapan pada quenching	31
Gambar 2. 23 Skema produk transformasi austenit pada pendinginan dan transformasi martensit pada pemanasan (Tempering)	33
Gambar 2. 24 Hubungan temperatur tempering pada kekuatan luluh dan tarik dan keuletan (%RA) (pada temperatur kamar) untuk paduan baja 4340 oil quench	34
Gambar 2. 25 Perbedaan struktur mikro dari martensite, tempered martensite, dan heavily tempered	36
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian	39
Gambar 3. 2 a.) Komponen crossbar yang crack. b.).Bagian crossbar yang masih terpasang.	41

Gambar 3. 3 (A) Spesimen potongan yang di indikasi ada initial crack (B) Spesimen untuk uji kekerasan jauh dari crack (C) Spesimen untuk proses perlakuan panas	41
Gambar 3. 4 Kamera Digital.....	42
Gambar 3. 5 Universal Hardness Tester	42
Gambar 3. 6 Streo Microscope	43
Gambar 3. 7 Mesin SEM – EDX FEI type Inspect S-50	44
Gambar 3. 8 Proses hardening dengan variasi temperatur dan media pendingin	45
Gambar 3. 9 (a) Kamera merk Canon tipe Mirrorless. (b)Stereomicroscope	46
Gambar 3. 10 Mesin SEM –EDAX FEI type Inspect S-50	47
Gambar 3. 11 Universal Hardness Tester HBRV 187.5A	47
Gambar 4. 1 Desain crossbar di PT. Semen Indonesia	49
Gambar 4. 2 Crossbar yang mengalami kegagalan (a) Tampak atas (b) Tambak samping	50
Gambar 4. 3 Pengamatan makro komponen crossbar gagal (crack)	51
Gambar 4. 4 Observasi stereomiskroskop bagian penampang retakan (<i>crack</i>)	52
Gambar 4. 5 Observasi SEM bagian penampang retakan (<i>crack</i>)	54
Gambar 4. 6 Struktur Mikro <i>crossbar</i> yang mengalami <i>crack</i> ..	56
Gambar 4. 7 Struktur Mikro Martensitic Grey Cast Iron.....	56
Gambar 4. 8 Crossbar yang mengalami kegagalan.....	58
Gambar 4. 9 (a) Daerah indentasi sejajar dengan crack (b) Daerah indentasi tegak lurus dengan crack	58
Gambar 4. 10 (a) Daerah indentasi tegak lurus arah pendinginan (b) Daerah indentasi sejajar arah pendinginan	59

Gambar 4. 11	Foto mikroskop <i>failure crossbar</i> : (A) <i>crossbar</i> H950-AQ, (B) <i>crossbar</i> H950-OQ, (C) <i>crossbar</i> H800-AQ, (D) <i>crossbar</i> H800-OQ	63
Gambar 4. 12	Foto mikroskop baja <i>failure crossbar</i> : (A) <i>crossbar</i> H950-AQ-T550t1h, (B) <i>crossbar</i> H950-OQ-T550t1h, (C) <i>crossbar</i> H800-AQ-T550t1h, (D) <i>crossbar</i> H800-OQ-T550t1h	65
Gambar 4. 12	Daerah Indentasi Uji Kekerasan	66
Gambar 4. 13	Grafik sifat kekerasan hasil proses hardening baja <i>crossbar</i>	67

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Komposisi Kimia pada ASTM A48	9
Tabel 2. 2 Sifat mekanik pada ASTM A48	9
Tabel 2. 3 Komposisi Kimia pada Baja AISI D2	10
Tabel 2. 4 Hardness Baja AISI D2	10
Tabel 2. 5 Perlakuan panas pada baja AISI D2	10
Tabel 2. 6 Permasalahan dalam kegagalan komponen mesin.....	17
Tabel 2. 7 Kasus kegagalan material akibat perawatan komponen mesin)	17
Tabel 2. 8 Penyebab kegagalan dalam komponen mesin	18
Tabel 3. 1 Rancangan penelitian.....	48
Tabel 4. 1 Data Operasi crossbar di clinker cooler Tuban 3 PT. Semen Indonesia	50
Tabel 4. 2 Komposisi kimia material crossbar dan material standard	55
Tabel 4. 3 Data Hasil Pengujian Kekerasan Dekat dari crack	60
Tabel 4. 4 Data Hasil Pengujian Kekerasan Material.....	60
Tabel 4. 5 Nilai kekerasan crossbar sesuai ASTM A48	61
Tabel 4. 6 Kode spesimen.....	62
Tabel 4. 7 Hasil Pengujian Kekerasan pada <i>crossbar</i> yang telah di hardening dan tempering (BHN).....	67

(halaman ini sengaja dikosongkan)



BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

PT. Semen Indonesia merupakan produsen semen terbesar di Indonesia. Salah satu kawasan pabrik PT Semen Indonesia yang memiliki kapasitas produksi terbesar sebesar 12,76 juta ton semen per tahun yang berlokasi di Desa Sumberarum, Kec Kerek, Tuban, Jawa Timur

Proses pembuatan semen secara garis besar dimulai dari pengambilan bahan baku, proses pembuatan klinker, proses penggilingan semen dan packing semen. Pada pengambilan bahan baku dimulai dengan menghancurkan, penimbunan, penggilingan bahan baku dan memasukkan ke silo. Proses klinker yaitu pemanasan awal, rotary kiln dan pendinginan (*Cooling*). Proses penggilingan yaitu pencampuran dengan aditif, grinding dan powdering. Proses packing yaitu memasukan semen ke dalam kemasan dan menyimpan ke dalam gudang. (Tansiswo Siagian 2009)

Clinker Cooler adalah salah satu peralatan yang memiliki fungsi sangat penting dalam industri semen. Cooler berfungsi sebagai pendingin material yang keluar dari kiln yang biasa disebut dengan *clinker* (terak) sehingga fungsinya sangat penting untuk kelangsungan produksi terak di Pabrik Tuban Semen Indonesia. Cooler akan mendinginkan terak yang dipanaskan oleh kiln kemudian akan diproses ke proses selanjutnya untuk menjadi semen. Terak yang dihasilkan oleh kiln akan didinginkan di dalam cooler, kemudian ukuran terak tersebut akan diperkecil dengan hammer yang ada di dalam cooler. Setelah itu terak yang masih bertemperatur kurang lebih 100°C akan dibawa menggunakan pan conveyor menuju clinker dome.

Kinerja clinker cooler sangat diperlukan karena apabila dalam operasinya cooler ini mengalami gangguan sedikit saja, maka dapat berupa kiln harus stop atau dapat mengganggu operasi lainnya seperti mengganggu operasi pada daerah finish mill. Cooler



membawa clinker dari kiln menuju clinker dome secara kontinyu, proses ini sejalan dengan produksi terak pada kiln, bila clinker cooler mati, produksi terak pada kiln memiliki kemungkinan untuk dihentikan karena temperature dari terak yang dihasilkan sangat tinggi sehingga memiliki potensi untuk merusak peralatan yang ada pada proses selanjutnya. Clinker cooler yang digunakan pada plant Tuban III merupakan peralatan yang memiliki teknologi terbaru. Cooler ini baru beroperasi selama kurang lebih enam bulan dan merupakan hasil modifikasi dari cooler generasi sebelumnya. Pada tanggal 21 Juli 2016 Cross Bar pada clinker cooler mengalami banyak retakan (*crack*). Permasalahan *crack* pada cross bar ini sudah pernah terjadi sebelumnya. Kerusakan ini mengakibatkan produksi semen mengalami penurunan dan material *crossbar* tersebut diganti dengan part yang baru. Sehingga membutuhkan biaya yang tidak sedikit sekaligus sangat menghambat proses produksi PT. Semen Indonesia. Oleh karena itu perlunya melakukan penelitian ini untuk menganalisa kegagalan yang terjadi dan meminimalisir terjadinya *crack* pada material *crossbar* yang ada di PT. Semen Indonesia (Persero) Tbk dengan melakukan proses pengerasan (*hardening*) dan quenching dengan media pendingin yang berbeda – beda antara lain udara dan oli. Kemudian dilakukan proses *tempering* juga.

1.2. Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah :

1. Apa faktor penyebab terjadinya kegagalan pada komponen *crossbar* di *clinker cooler* ?
2. Bagaimana mekanisme kegagalan pada komponen *crossbar* di *clinker cooler* ?
3. Bagaimana pengaruh proses *hardening* dengan variasi temperatur dan media pendingin sebagai solusi kegagalan yang terjadi pada komponen *crossbar* pada *clinker cooler*?



1.3. Batasan Masalah

Agar penelitian ini menjadi terarah dan memberikan kejelasan analisis permasalahan, maka dilakukan pembatasan permasalahan sebagai berikut :

1. Data operasi seperti temperatur, kecepatan gerak pada *crossbar* sudah memenuhi standar operasional.
2. Desain *crossbar* memenuhi standart operasional.
3. Pengaruh lingkungan diabaikan.
4. Material dianggap homogen di semua sisi
5. Diasumsikan tidak ada penurunan temperatur saat material uji keluar dari dapur pemanas.
6. Lama waktu pemindahan specimen uji dari dapur ke media pendingin diasumsikan konstan pada semua specimen uji.

1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah :

1. Menganalisa faktor penyebab terjadinya kegagalan pada komponen *crossbar* pada *clinker cooler*.
2. Menganalisa mekanisme kegagalan kemponen *crossbar* pada *clinker cooler*.
3. Menganalisa pengaruh proses *hardening* dengan variasi temperatur dan media pendingin sebagai solusi kegagalan yang terjadi pada komponen *crossbar* pada *clinker cooler*.

1.5 Manfaat Penelitian

Hasil dari penelitian ini diharapkan mampu memberi manfaat kepada seluruh pihak yang berkaitan, yaitu mahasiswa sebagai pelaksana penelitian mampu memahami serta mengaplikasikan ilmu yang telah didapat khususnya cabang ilmu material dan metalurgi, PT. Semen Indonesia Tbk sebagai pihak utama yang menyokong penelitian dapat menerapkan hasil penelitian untuk:

1. Masukan untuk hal-hal yang dapat dilakukan agar kegagalan pada *crossbar* dapat ditanggulangi



2. Referensi pemilihan bahan serta *maintenance* pada *crossbar*.
3. Refrensi perlakuan panas pada *crossbar*.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Pengertian *Clinker Cooler*

Pada industri semen, *clinker* yang sudah diproses dari awal dipanaskan pada *rotary kiln* dengan temperatur $\pm 1800^{\circ}\text{C}$ selanjutnya akan diturunkan di *clinker cooler* dari temperatur $\pm 1450^{\circ}\text{C}$ sampai dengan temperatur $\pm 100\text{--}250^{\circ}\text{C}$ untuk selanjutnya akan dihancurkan oleh *hammer crusher*.

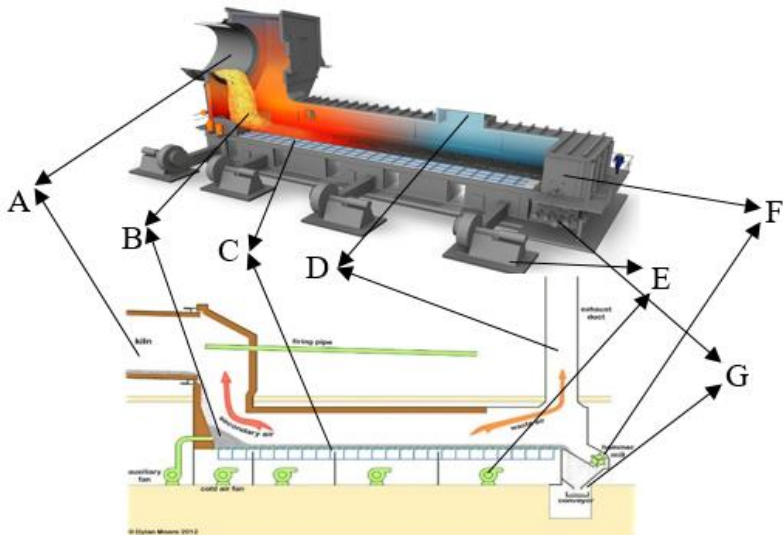
Pada pabrik PT. Semen Indonesia plant Tuban 3, Jenis *clinker cooler* yang digunakan ialah *crossbar type* *clinker cooler* buatan FL Smidth (Gambar 2.1). *Cooler* ini merupakan *cooler* generasi terbaru dengan mengaplikasikan teknologi pendinginan material *clinker* yang sangat canggih. *Cooler* ini baru berumur kurang lebih 6 bulan di PT. Semen Indonesia karena merupakan alat yang baru setelah dilakukan modifikasi terhadap *cooler* yang lama (tipe *grate plate*).

Pada *clinker cooler* (gambar 2.1.) proses pendinginan *clinker* (B) yang keluar dari *rotary kiln* (A) dilakukan dengan mengalirkan udara dari sejumlah *fan* (E), yang selanjutnya dihembuskan melalui celah – celah landasan (*crossbar*) (C) yang bergerak mengantarkan *clinker* menuju ke *hammer crusher* (F). Udara panas didalam *clinker cooler* keluar melalui *exhaust duct* (D). Setelah temperatur *clinker* turun dan ukurannya menjadi halus, *clinker* akan dibawa *conveyor* (G) untuk diteruskan ke proses selanjutnya.

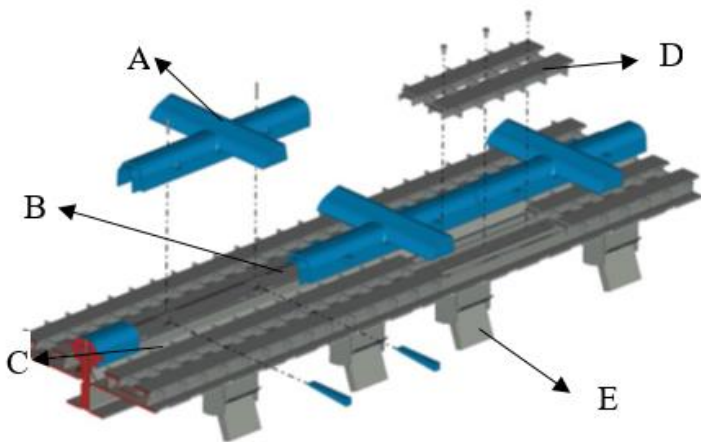
Kapasitas desain *clinker cooler* adalah 7800 ton / hari sedangkan luas permukaan efektifnya adalah 160.6 m^2 , terdapat 3 *section* pada *clinker cooler* antara lain *inlet*, *existing*, dan *extended*. (Firdaus, 2007). Proses pendinginan *clinker* di dalam *clinker cooler* merupakan salah satu proses yang cukup penting mendapat perhatian dalam produksi semen. Hal ini disebabkan karena proses pendinginan *clinker* setelah melewati pemanasan di dalam *rotary kiln*, merupakan salah satu faktor dalam upaya menghasilkan *clinker* dengan kualitas yang diharapkan (Silika



ratio:2.44, Alumina ratio:1.54, Lime saturation: 96.2). (Anwar, 2011)



Gambar 2. 1 Komponen utama clinker cooler (FLSmidth, 2016)



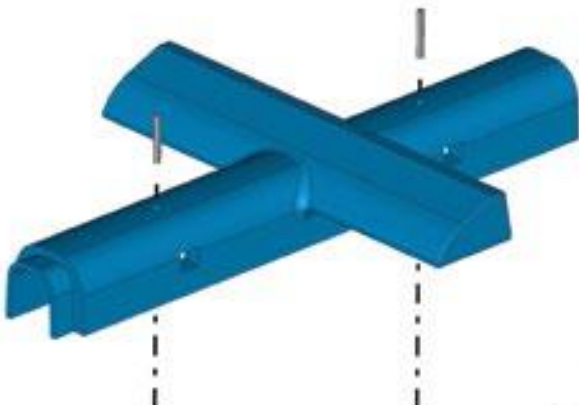
Gambar 2. 2 Cooler (FLSmidth Komponen, 2016)

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Secara umum komponen *cooler* (Gambar 2.2) dapat dibedakan menjadi 3 bagian utama yaitu : *cooling chamber*, *cooler drive*, dan *cooler hammer*. *Cooling chamber* berfungsi sebagai tempat terjadinya pendinginan *clinker* seperti komponen *crossbar* (A), *air distribution plate* (D), *mechanical flow regulator* (E). *Cooler drive* terdiri atas *drive plate* (B) dan *actuator* (C) yang berfungsi untuk alat transport *clinker* menuju ke *cooler hammer* sebelum diproses untuk menjadi bahan baku pembuat semen.

2.2. Pengertian *Crossbar*

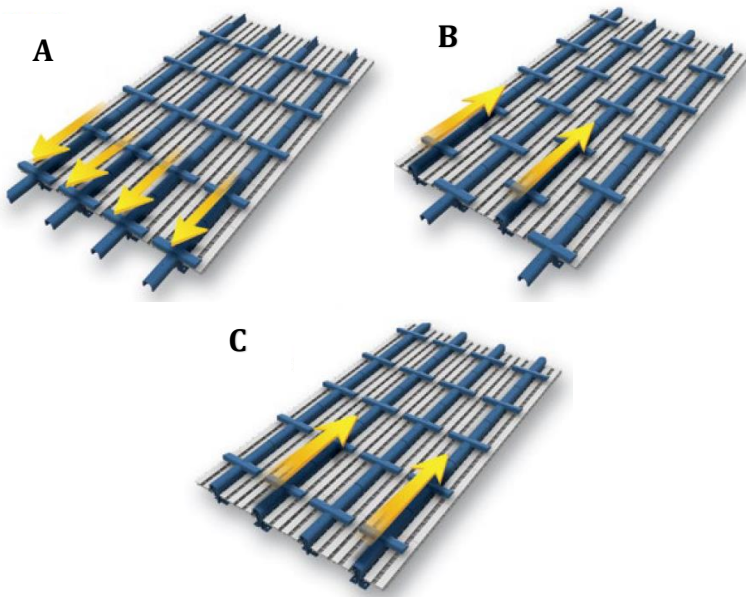
Crossbar (Gambar 2.3) merupakan bagian dari *cooler* yang kontak langsung dengan *clinker*. Material dari *cross bar* biasanya berupa *cast iron* atau *forged carbon steel* yang berfungsi sebagai media pendingin dan transport *clinker*. *Cross bar* digerakkan oleh *drive plate* dengan tujuan untuk memindahkan *clinker* dari inlet cooler menuju outlet cooler (*hammer crusher*). Selain berfungsi sebagai media pendinginan *clinker* secara konduksi, *cross bar* juga berfungsi untuk melindungi *drive plate* dari material *clinker* yang memiliki temperatur tinggi. (Setiyana 2007)



Gambar 2. 3 *crossbar* (FLSmidth 2016)



Mekanisme *crossbar cooler* dirancang secara optimal untuk efisiensi transportasi *clinker*. Setiap baris bergerak dalam frame pendingin yang dioperasikan oleh 2 atau 4 silinder hidrolik, Tergantung pada ukuran *cooler*, dan memiliki *independent drive*. *Crossbar* bekerja dengan cara seperti pada gambar 2.4. Semua bar bergerak maju (Gambar 2.4. (a)) kemudian setiap baris lainnya bergerak mundur (Gambar 2.4. (b)) dan sisanya baris lainnya bergerak mundur (Gambar 2.4. (c)) kemudian berulang secara terus menerus. *Crossbar* ini bekerja pada temperatur 500°C - 600°C.



Gambar 2. 4 Mekanisme *crossbar* (FLSmith 2016)

2.3. Material *Crossbar* (ASTM A48)

Material *crossbar* yang sesuai standar adalah besi tuang kelabu (*grey cast iron*) yang sesuai dengan ASTM A48. Besi cor kelabu cocok sebagai aplikasi *internal combustion engine cylinder blocks*, *pump housings*, *valve bodies*, *electrical boxes*, and *decorative castings*. Spesifikasi fasa yang terbentuk pada besi cor

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



kelabu antara lain *pearlite* dan *ferrite*. **Tabel 2.1** menunjukkan komposisi kimia dari ASTM A48 antara lain sebagai berikut :

Tabel 2. 1 Komposisi Kimia pada ASTM A48 (ASTM A48, 1999)

ASTM	Komposisi (wt%)				
	C	Mn	Si	S	P
A48	2,7-4	0.8	1.8-3	0.07	0.2

Sifat mekanik dari ASTM A48 juga bermacam-macam. **Tabel 2.2** menunjukkan macam-macam sifat mekanik pada ASTM A48. Salah satunya adalah nilai kekerasan pada ASTM A48 (ASTM A48, 1999)

Tabel 2. 2 Sifat kekerasan pada ASTM A48 (ASTM A48,1999)

Type of Gray Cast Iron	Matrix Microstructure Around Flake Graphite	Brinell Hardness (BHN)
Soft-Annealed	All Ferrite	110-140
Ordinary	Pearlite and Ferrite	140-200
Higher Strength	Fine Pearlite	200-270
Alloyed-Arcicular	Bainite	260-350
Austenitic (Ni-Resist)	Austenite	140-160
Heat Treat Hardened	Martensite	480-550
Hardened and Tempered	Tempered Martensite	250-450
Chilled (White Iron)	Pearlite and Carbides	400-500

2.4. Baja AISI D2

Material ini adalah Baja paduan dengan kandungan karbon tinggi, krom tinggi. **Tabel 2.3** menunjukkan komposisi kimia pada baja AISI D2 antara lain sebagai berikut :

Tabel 2. 3 Komposisi Kimia pada Baja AISI D2 (ASTM A681, 1999)

AISI	Komposisi (wt%)						
	C	Si	Mn	Cr	S	P	Mo
D2	1.4-	0.1-	0.1-	11-	0.03	0.03	0.7-
	1.6	0.6	0.6	13	Max	Max	1.2



Meskipun sebagian besar aplikasi dari alat baja D2 melibatkan kerja dingin, juga banyak digunakan untuk kerja di temperature tinggi juga. Aplikasi yang umum termasuk *blanking dies, slitting cutters, shear blades, forming dies, knurls, gages (plug and thread), punches, trimming dies*, etc. (Arain 1999)

Sifat mekanik dari AISI D2 juga bermacam-macam, salah satunya adalah kekerasan. **Tabel 2.4** menunjukkan macam-macam nilai kekerasan pada AISI D2. (ASTM A681, 1999)

Tabel 2. 4 Hardness Baja AISI D2 (ASTM A681, 1999)

Type	Annealed BHN	Cold Drawn BHN
D2	255	269

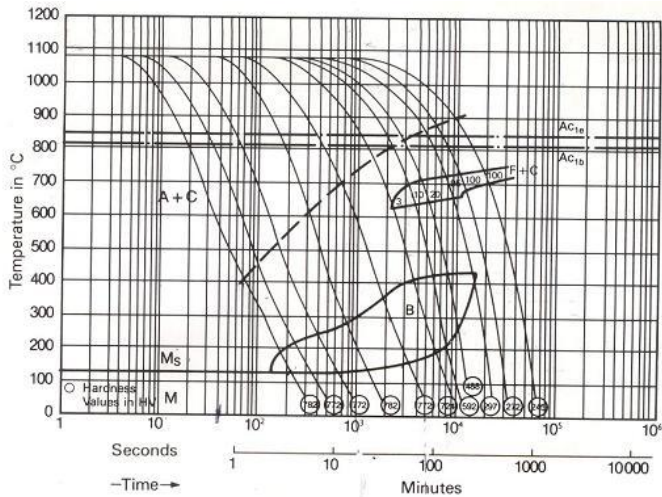
Perlakuan panas dapat dilakukan pada baja AISI D2. Pada **Tabel 2.5** dijelaskan tentang macam-macam perlakuan panas yang dapat dilakukan.

Tabel 2. 5 Perlakuan panas pada baja AISI D2 (ASTM A681, 1999)

Type	Preheat Temperature °C	Austenitizing Temperature °C		Quench Medium	Tempering Temperature
		Salt Bath	Controlled Atmosphere Furnaces		
D2	816	996	1010	Air	204

Diagram transformasi (Diagram CCT) yang digunakan sebagai acuan pada rekayasa proses perlakuan baja AISI D2 seperti Pada Gambar 2.5., digunakan untuk mengetahui laju pendinginan yang diperlukan untuk menghasilkan suatu struktur mikro dan sifat mekanik (kekerasan) tertentu.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



Pada Gambar 2.6 menunjukkan mikrostruktur dari Baja AISI D2 yang terdiri dari sementite, pearlite, dan karbida Cr (Muslim 2008)



2.5. Diagram Fase Fe-Fe₃C

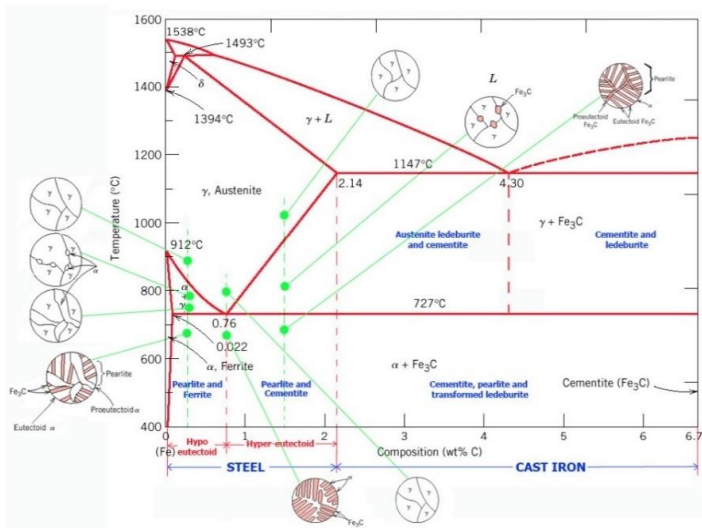
Dalam besi cair karbon dapat larut, tetapi dalam keadaan padat kelarutan karbon dalam besi akan terbatas. Selain sebagai larutan padat, besi dan karbon juga dapat membentuk senyawa *interstisial* (*interstitial compound*), eutektik dan juga eutektoid, atau mungkin juga karbon akan terpisah (sebagai grafit). Karena itu diagram fase besi-karbon ada 2 macam, diagram fase besi – karbida besi dan diagram fase besi – grafit.

Diagram keseimbangan besi – karbon cukup kompleks, tetapi hanya sebagian saja yang penting bagi dunia teknik, yaitu bagian antara besi murni sampai senyawa *interstitialnya*, karbida besi Fe₃C, yang mengandung 6,67 %C. dan diagram fase yang banyak digunakan adalah diagram fase besi – karbida besi, diagram Fe – Fe₃C.

Pada keadaan yang betul – betul ekuilibrium karbon akan berupa karbon bebas (grafit), sehingga akan diperoleh diagram kesetimbangan besi - grafit. Perubahan – perubahan dalam keadaan ekuilibrium berlangsung terlalu lama. Seharusnya karbida besi akan terjadi pada temperatur kamar (pada temperatur sekitar 700°C pun perubahan ini akan makan waktu bertahun – tahun). Dalam hal ini karbida besi dikatakan sebagai suatu struktur yang metastabil. Diagram fase besi – karbida dapat dilihat pada Gambar 2.7. (Avner, 1974)

Dari Gambar 2.7. tampak bahwa diagram fase ini memiliki tiga garis mendatar yang menandakan adanya reaksi yang berlangsung secara *isothermal*, yaitu :

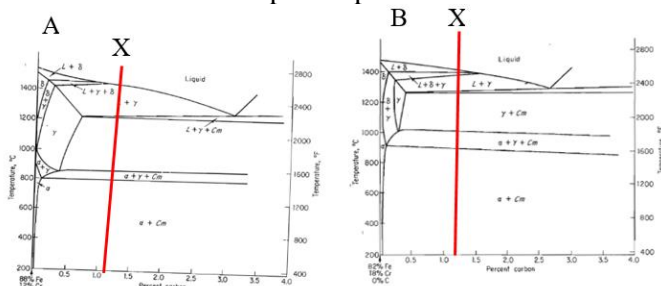
- Pada 1496°C, kadar karbon antara 0.10 – 0.50 %, berlangsung reaksi peritektik. $L + \delta \rightarrow \gamma$ (daerah ini tidak begitu penting untuk dunia teknik)
- Pada 1130°C, kadar karbon antara 2,0 – 6,67 %, berlangsung reaksi eutektik. $L \rightarrow \gamma + Fe_3C$
- Pada 723°C, kadar karbon antara 0.025 – 6.67 %, berlangsung reaksi eutektoid. $\Gamma \rightarrow \alpha + Fe_3C$



Gambar 2. 7 Diagram fase Fe - Fe₃C (Avner, 1974)

2.6. Diagram Fase Fe – 12% & 18% wt Cr – C

Material *crossbar* yang gagal adalah baja dengan kadar *chromium* yang sangat tinggi yaitu 16.344 % Cr. Baja perkakas yang biasa diproduksi adalah Baja perkakas hipereutektik, pada Gambar 2.8. menunjukkan diagram fasa Fe – Fe₃C yang mengandung unsur Cr sebesar 12% & 18%. Adanya Cr menaikkan temperature krisis dan mempersempit daerah austenite.



Gambar 2. 8 (A) Diagram fase Baja Chrom pada 12% Cr dan (B) Diagram fase Baja Chrom pada 18% Cr (Avner, 1974)



Jika memplotkan material *crossbar* yang standar dengan kadar karbon 1.1742 %C (**Garis X**), maka saat dilakukan pemanasan diatas temperature austenit dan kemudian dilakukan pendinginan secara cepat (*quenching*) dan dilakukan proses *tempering* maka akan diperoleh fasa martensit temper. Mengingat bahwa martensit adalah struktur yang sangat keras dan getas maka baja yang digunakan sebagai *crossbar* adalah yang mengandung sejumlah besar martensit temper yang memiliki sifat mekanik yang tidak sekeras dan segetas fasa martensit. (Avner, 1974)

2.7. Baja Paduan

Baja adalah paduan besi dan karbon yang mungkin mengandung unsur paduan lainnya; ada banyak jenis paduan yang memiliki komposisi dan perlakuan panas yang berbeda. Sifat mekanik sangat dipengaruhi oleh kandungan karbon, yang biasanya kurang dari 1,0 wt%. Pada umumnya baja diklasifikasikan menurut konsentrasi karbon yaitu karbon rendah, menengah, dan tinggi. Selain itu juga dapat dikelompokkan berdasarkan kandungan unsur paduannya. Baja karbon biasa (*plain carbon steel*) yang hanya berisi konsentrasi karbon dan baja selain itu memiliki sedikit pengotor dan sedikit paduan manganese. Untuk baja paduan, unsur paduan ditambahkan untuk tujuan tertentu dengan konsentrasi tertentu. (Callister, 2007)

2.7.1. Baja Paduan Tinggi (*High Alloy Steel*)

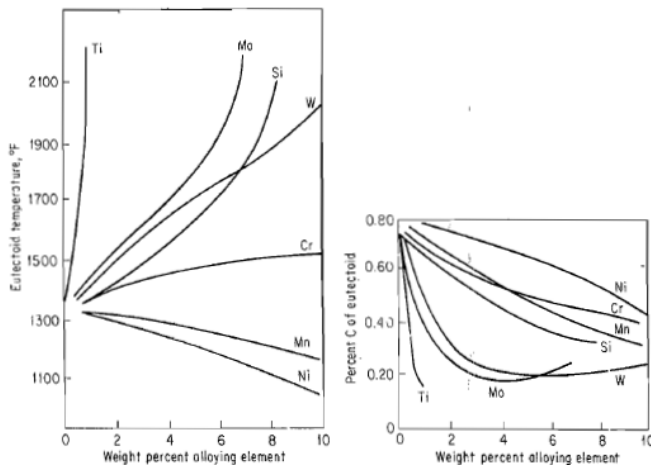
Baja paduan tinggi merupakan baja paduan yang elemen paduannya lebih dari 10% wt, misalnnnya unsur Cr, Mn, Ni, S, Si, P dan lain-lain.

Baja paduan tinggi biasanya memiliki sifat tertentu antara lain baja tahan karat (*stainless steel*), baja perkakas (misalnya *High Speed Steel (HSS)*), *heat resisting steel*, dan lain lain. (Amanto, 1999).



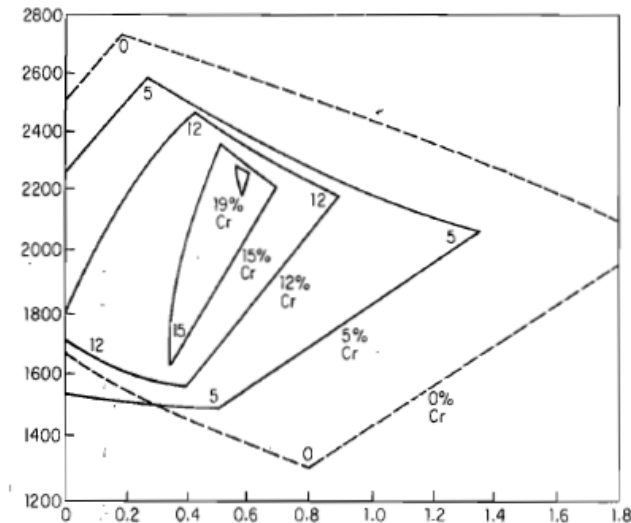
2.7.2. Pengaruh terhadap diagram fasa

Adanya unsur paduan di dalam baja akan merubah diagram fase baja. Pada umumnya titik eutektoid akan tergeser ke kiri, sehingga kadar karbon di dalam perlit akan kurang dari 0,8%. Unsur paduan yang berfungsi sebagai penstabil austenit, yaitu Ni dan Mn, menurunkan temperatur eutektoid, sedangkan unsur paduan penstabil ferrit, akan menaikkan temperature eutektoid (Gambar 2.9.) Jadi unsur paduan penstabil ferrit akan menggeser titik eutektoid ke kiri atas, sedang penstabil austenite menggeser titik eutektoid ke bawah. (Avner, 1974)



Gambar 2.9 Pengaruh unsur paduan terhadap temperatur eutektoid (kiri) dan kadar dalam eutektoid (kanan) (Avner, 1974)

Selain itu unsur paduan penstabil ferrit akan memperluas daerah ferrit dan memperkecil daerah austenit, ini digambarkan dengan makin sempitnya daerah austenit dari baja dengan kadar karbon kromium yang makin tinggi seperti pada Gambar 2.10. (Avner, 1974)



Gambar 2. 10 Pengaruh kadar chromium terhadap luasan daerah austenite (Avner, 1974)

2.8. Analisa Kegagalan

Analisa kegagalan dapat diartikan sebagai pemeriksaan/pengujian terhadap komponen-komponen atau struktur yang mengalami kerusakan beserta kondisi yang menyebabkan kegagalan dengan tujuan untuk mengetahui penyebab dari kegagalan tersebut. Jadi tujuan utama dari analisa kegagalan adalah untuk mengetahui mekanisme terjadinya kegagalan serta memberikan solusi-solusi yang dapat dilaksanakan untuk menanggulangi masalah kegagalan tersebut.

Dengan kata lain, analisa kegagalan berujung pada observasi pada komponen-komponen yang rusak. Pengamatan pola patahan yang rusak adalah kunci bagi seluruh proses analisa kegagalan, oleh sebab itu pengamatan secara makrokopis dan mikrokopis harus dilaksanakan secara bertahap. Selain itu pengujian mekanik juga diperlukan karena secara umum kegagalan disebabkan oleh gaya-gaya yang bekerja dari lingkungan kerja komponen.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



Menurut sumber-sumber penelitian yang ada di dunia industri (Brooks 2002). Faktor penyebab kegagalan yang sering terjadi di dunia industri dapat dikarenakan :

1. Faktor kesalahan pemilihan material

Hasil penelitian mengenai faktor kegagalan material yang dominan yaitu faktor kesalahan dalam memilih material. Tabel 2.6 dibawah ini menunjukkan statistik tentang permasalahan dalam kasus kegagalan material

Tabel 2. 6 Permasalahan dalam kegagalan komponen mesin
(Brooks 2002)

Permasalahan	%
Kesalahan pemilihan material	38
Cacat produksi	15
Kesalahan perlakuan panas	15
Kesalahan desain mekanik	11
Kondisi operasi yang berlebihan	8
Kondisi lingkungan yang tidak terkontrol	6
Pemeriksaan yang kurang baik	5
Material yang tidak jelas	2

2. Perawatan komponen yang kurang baik

Proses perawatan komponen mesin yang kurang baik termasuk salah satu penyebab kegagalan yang paling dominan. Tabel 2.7 menunjukan data mengenai kasus kegagalan material yang terjadi.

Tabel 2. 7 Kasus kegagalan material akibat perawatan komponen mesin (Brooks 2002)

Permasalahan	%
Perawatan yang kurang baik	44
Cacat saat fabrikasi	17
Defisiensi desain	16
Pemakaian yang abnormal	10
Cacat material	7
Penyebab yang tidak jelas	6



3. Kesalahan dalam perancangan komponen

Faktor kesalahan dalam proses perancangan komponen mesin adalah sebagai berikut:

1. Kegagalan ulet akibat pembebanan yang melebihi kekuatan material
2. Kegagalan getas akibat beban kejut
3. Kegagalan pada temperatur tinggi (pemuluran)
4. *Static delayed fracture*
5. Proses perancangan yang terlalu banyak memicu konsentrasi tegangan seperti takikan
6. Analisa tegangan komponen yang kurang detail yang menyebabkan rawan terjadi kegagalan akibat *overload*
7. Kesalahan dalam menentukan material dari komponen mesin sehingga mempengaruhi hitungan yang dilakukan.
4. Kondisi kerja yang ekstrim

Permasalahan yang spesifik dalam kegagalan komponen mesin akibat kondisi kerja yang ekstrim disajikan dalam Tabel 2.8.

Tabel 2. 8 Penyebab kegagalan dalam komponen mesin (Brooks 2002)

Penyebab Kegagalan	%
Korosi	29
Kelelahan (<i>fatigue</i>)	25
Kegagalan getas (<i>brittle fracture</i>)	16
Kelebihan beban	11
Korosi temperature tinggi	7
Korosi retak tegang, korosi lelah, penggetasan hydrogen	6
Pemuluran (<i>creep</i>)	3
Abrasi, Erosi	3

2.8.1. Prosedur Dalam Analisa Kegagalan

Ketika terjadi sebuah kegagalan atau retak, perlu dilakukan suatu tindakan untuk mencegah terjadinya kegagalan yang sama dengan menginvestigasi dan menganalisa kegagalan komponen

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



yang terjadi. Adapun tindakan yang perlu dilakukan dalam menginvestigasi komponen yaitu (Nishida 1992):

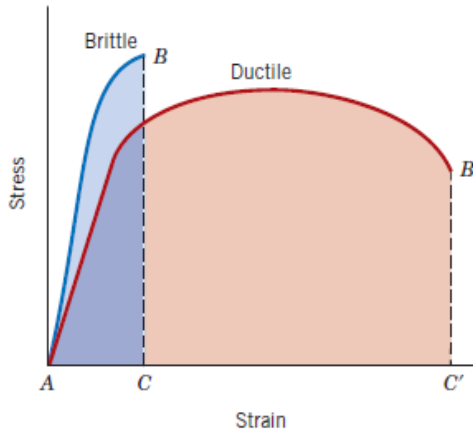
1. Material yang digunakan
 - a. Data produksi : *melting, rolling, forming, casting, heat treatment*, dan proses *machining*
 - b. Analisa kimia : pengujian X-Ray, komposisi kimia
 - c. Sifat mekanik : *tensile, bending, hardness, impact*, dan *fatigue test*.
 - d. Struktur metalurgi : struktur makro dan mikro struktur
 - e. Pengerasan permukaan dan tegangan sisa ; *finishing*
 - f. Patah permukaan
2. Desain tegangan dan kondisi perawatan
 - a. Kekuatan dari luar : golongan, besar, pengulangan.
 - b. Atmospher : udara, air, air laut, dan sebagainya
 - c. Yang lain : kondisi perbaikan
3. Uji percobaan
 - a. Uji laboratorium : perhitungan tegangan (kekuatan material, *finite element method* (FEM), kekuatan lelah, kekerasan patahan.
 - b. Konfirmasi uji lapangan : ukuran tegangan, uji produksi.
4. Hasil uji seluruhnya.

2.9. Patah Getas dan Patah Ulet

Patahan adalah spesimen dari sebuah benda menjadi 2 atau lebih potongan karena terjadinya tegangan statik dan pada temperature yang relatif rendah terhadap titik leleh dari suatu material. Tegangan yang terjadi pada material bisa merupakan tegangan tarik, tegangan kompresi, tegangan geser ataupun torsi. Dalam rekayasa material terdapat dua jenis mode patahan yang mungkin terjadi yaitu patahan ulet dan patah getas. Klasifikasi jenis patahan ini berdasarkan kemampuan sebuah material dalam menerima deformasi plastis yang dapat menyerap energi yang besar sebelum terjadi patahan. Material yang ulet mempunyai deformasi plastis yang tinggi, pembentukan *small cavity* diujung



retak, serta retak memanjang atau menjalar bertahap. Sedangkan pada material yang getas mempunyai deformasi plastis rendah, tegangan lokal meningkat pada ujung retak sehingga retak menjalar dengan sangat cepat. Pada Gambar 2.11. ditunjukkan diagram tegangan dan regangan dari patahan ulet dan getas.



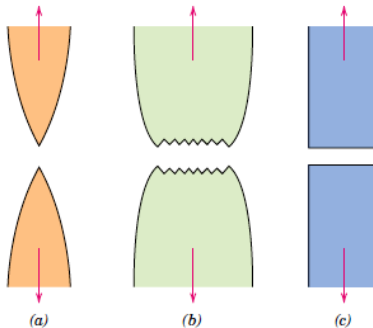
Gambar 2. 11 Skematik ciri patah getas dan patah ulet dari diagram tegangan-regangan(Callister,2007)

Patahan ulet dan getas pada suatu material tergantung pada kondisi pembebanan. Pada proses terjadinya patahan melibatkan dua tahap yaitu terbentuknya retak dan perambatan sebagai respon dari tegangan yang dialami oleh material. Modus patahan sangat bergantung pada perambatan retak.

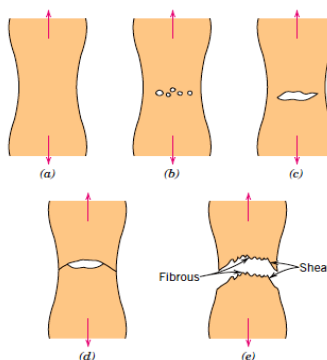
2.9.1 Patahan Ulet

Bentuk patahan ulet memiliki karakteristik yang berbeda jika diamati secara makroskopis. Pada Gambar 2.12. ditunjukkan skematik representative dari dua karakteristik profil patahan secara makro. Konfigurasi yang ditunjukkan oleh Gambar 2.12.(a) ditemukan pada material lunak seperti emas pada temperature ruang dan metal, polimer dan inorganik gelas pada temperature yang relatif tinggi.

Secara umum profil patahan material ulet akibat tegangan tarik ditunjukkan pada Gambar 2.12.(b) dimana patahan didahului oleh adanya necking. Proses patahan ulet dari material terjadi dalam beberapa tahap. Pertama, setelah terjadi pengecilan luasan setempat (*necking*) *cavities* kecil atau *microvoid* terbentuk di dalam struktur material seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.13.



Gambar 2. 12 (a) bentuk patahan ulet, (b) bentuk patahan ulet setelah terjadi necking, (c) bentuk patahan getas tanpa terjadi deformasi plastis (Callister,2007)



Gambar 2. 13 Tahap patahan cup dan cone (a) awal necking, (b) terbentuknya cavity kecil, (c) pengumpulan cavity hingga menjadi retakan, (d) perambatan retak, (e) patahan geser dengan sudut 45o terhadap arah tegangan(Callister,2007)



Kemudian dengan bertambahnya deformasi akibat tegangan maka *microvoid* membesar dan berkumpul menjadi satu yang kemudian *coalesce* membentuk retak secara elips yang memiliki panjang tegak lurus dari arah pembebanan. Retak kemudian tumbuh sejajar dengan arah pembebanan, akhirnya patahan terbentuk oleh perambatan retak yang cepat disekitar area *necking* seperti Gambar 2.13. (e) oleh deformasi geser pada sudut disekitar arah tegangan tarik dimana sudut ini merupakan tegangan geser tertinggi. Terkadang sebuah patahan mempunyai karakteristik kontur seperti *cup* dan *cone* karena salah satu permukaan patahan menyerupai *cone*. Spesimen yang mempunyai bentuk patahan seperti ini berbentuk fibrous yang tidak teratur dimana hal ini menandakan deformasi plastis. Lebih jauh lagi untuk mengetahui informasi mengenai penentuan secara pengujian dengan menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM). Studi mengenai tipe patahan disebut *fractographic*. *Scanning Electron Microscope* (SEM) lebih banyak digunakan dalam mengamati bentuk crack, patahan karena mempunyai resolusi dan kedalaman observasi yang lebih tinggi dari mikroskopik optik. Gambar 2.14. menunjukkan patah ulet *cup* dan *cone* dan perbedaan patah getas pada *mild steel*

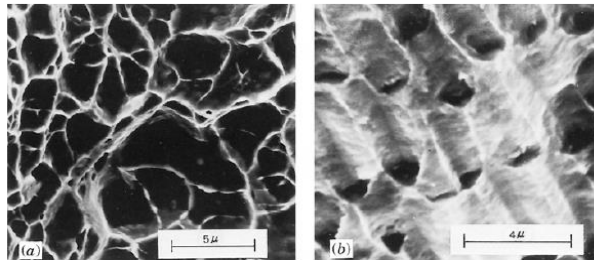


Gambar 2. 14 (a) patah ulet (*cup and cone*) pada aluminium, dan (b)patah getas pada *mild steel* (Callister,2007)

Pada skala makro, patah ulet ditunjukkan dengan adanya perubahan ketinggian yang nyata sepanjang penampang potongan melintang dari benda, biasa dikenal dengan istilah *shear lips*. Kemudian pada skala mikro, patah ulet ditandai dengan adanya profil *dimple* pada permukaan patahnya yang disebabkan oleh

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

penjalaran retakan mikro (*microvoids coalescence*) pada gambar 2.15.



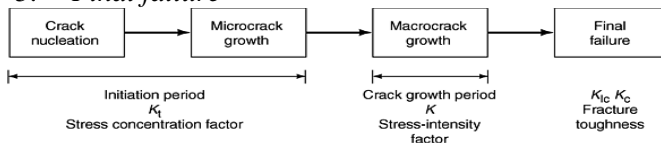
Gambar 2. 15 (a) SEM yang menunjukkan spherical dimple karakteristik, patahan hasil beban tarik uniaxial, 3300 \times , dan (b) SEM yang menunjukkan spherical dimple karakteristik hasil beban geser, 5000 \times (Callister, 2007)

2.10. Mekanisme Pembentukan Patah Lelah

Kelelahan mengakibatkan terjadinya patah lelah. Patah lelah terjadi melalui tiga tahap yaitu tahap retak awal (*crack initiation*), tahap penjalaran retak (*crack propagation*), dan tahap patah statis. Dan setelah retak lelah merambat cukup jauh, maka beban yang bekerja hanya akan didukung oleh penampang tersisa yang belum retak dan akhirnya komponen akan patah (tahap *final failure*).

Menurut Schijve, terdapat 5 fase yang selama proses *fatigue*, yaitu : (ASM Handbook Committee Volume 19, 2002):

1. *Cyclic slip*
2. *Crack nucleation*
3. *Growth of microcrack*
4. *Growth of macrocrack*
5. *Final failure*

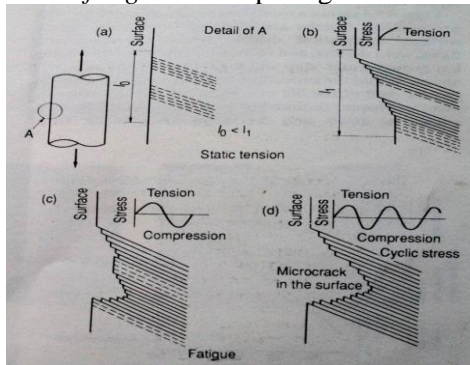


Gambar 2. 16 Mekanisme patah lelah dan faktornya (ASM Handbook Vol.19 Fatigue and Fracture, 2002)



2.10.1 Tahap Retak Awal (*Crack Initiation*)

Awal retak biasanya dimulai dari permukaan. Hal ini terjadi karena permukaan menerima beban terbesar dan paling memungkinkan terjadinya konsentrasi tegangan yang disebabkan oleh adanya perubahan dimensi pada permukaan atau proses pengerjaan tertentu pada material. Adanya cacat dalam menyebabkan juga konsentrasi tegangan. Fenomena awal retak secara sederhana diberikan oleh Wood. Beberapa model diberikan dalam menjelaskan *fatigue crack* pada gambar 2.17.



Gambar 2. 4 Model Wood untuk pengintian retak (Nishida, Shin-ichi,1992)

Pada beban tarik pertama, slip terjadi dengan membentuk permukaan bertingkat yang membentuk sudut 45° dengan sumbu tegangan. Hal ini akibat tegangan geser maksimal yang terjadi pada sudut tersebut. Pembebanan selanjutnya menyebabkan slip pada arah yang berlawanan. Slip ini terjadi pada bidang yang berdekatan dengan yang pertama. Dan selanjutnya merupakan proses pengulangan dalam pembebanan siklus yang sama. Tahap retak awal ini meliputi fase *cyclic slip*, fase pembentukan inti retak (*crack nucleation*) dan pertumbuhan retak mikro (*growth of microcrack*).

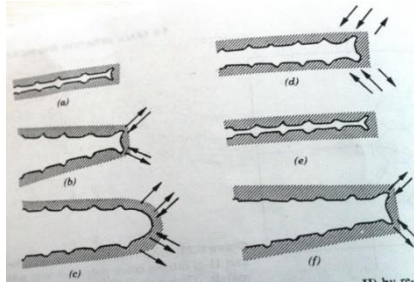
2.10.2 Tahap Perambatan Retak (*Crack Propagation*)

Perambatan retak pada suatu komponen terjadi jika tegangan maksimum pada ujung retakan berada di atas kekuatan material.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Hal ini mengakibatkan peningkatan konsentrasi tegangan pada ujung retak. Awal retakan mula-mula menjalar pada bidang slip di dalam beberapa butir dengan kecepatan yang sangat lambat. Pengamatan secara makro tidak menampakkan perambatan ini. Peristiwa ini disebut perambatan retak tahap I.

Selanjutnya pertumbuhan retak pada tahap II ditandai dengan adanya striasi. Pada tahap ini pertumbuhan retak tegak lurus dengan tegangan tarik maksimum. Retakan mulai kelihatan dengan mata telanjang, oleh karena itu disebut dengan retak makro. Pengamatan retak pada penelitian biasanya difokuskan pada tahap ini. Adapun model mekanisme crack secara plastis terdapat pada Gambar 2.18 dibawah ini.



Gambar 2. 18 Mekanisme penumpulan ujung retakan secara plastis (a) beban nol (b) beban tarik kecil (c) beban tarik maksimum (d) beban-tekan maksimum (e) beban nol (f) beban tekan minimum (Callister,2007)

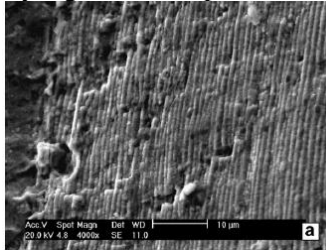
2.11. Karakteristik Patahan

Klasifikasi dasar dari proses patah bila ditinjau dari modus dan penyebabnya adalah patah ulet, patah getas, patah lelah (*fatigue*), dan patah merangkak (*creep/monotonic*). Masing-masing dari jenis patahan diatas memiliki karakteristik tersendiri. Berikut adalah karakteristik dasar untuk membedakan jenis patah lelah dengan patah merangkak, jenis patah getas dengan patah ulet pada skala makro, dan jenis patah getas dengan patah ulet pada skala mikro (ASM Handbook Committee Volume 12, 2002):



- ❖ Perbedaan karakteristik antara patah lelah dengan patah merangkak

Beachmarks dan striasi mengindikasikan patah lelah, sedangkan pada patah merangkak parameter tersebut tidak terlihat. Pertama kehadiran beach marks bisa diketahui melalui pengamatan makro menggunakan *stereomicroscope*, dan striasi hanya bisa diamati pada saat dilaksanakan *SEMfractography* (Gambar 2.19). Profil *beachmarks* dan striasi ini merupakan hasil dari fluktuasi beban yang diberikan pada benda.



Gambar 2. 5 Foto SEM yang menunjukkan Beachmarks dan striasi secara mikro (Poursaedi, 2005)

- ❖ Perbedaan karakteristik antara patah getas dengan patah ulet pada skala makro

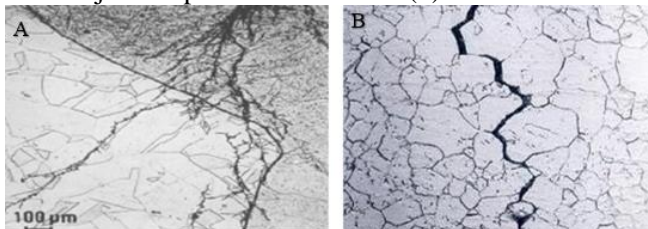
Pada skala makro, patah ulet ditunjukkan dengan adanya perubahan ketinggian yang nyata sepanjang penampang potongan melintang dari benda, biasa dikenal dengan istilah *shear lips*. Kemudian pola patah getas ditunjukkan dengan permukaan patahan yang datar dan tegak lurus terhadap arah beban, serta tanpa adanya petunjuk bahwa telah terjadi deformasi plastis sebelum benda mengalami patah. Selain kedua karakteristik diatas, terdapat pola patahan gabungan (*mix-mode appearance*) baik patah getas yang bertransformasi jadi ulet ataupun patah ulet yang bertransformasi menjadi getas. Kebanyakan kasus yang terjadi adalah patah getas bertransformasi menjadi patah ulet. Contoh ciri patah ulet ditunjukkan pada Gambar 2.20.

- ❖ Perbedaan karakteristik antara patah getas dengan patah ulet pada skala mikro

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Pada skala mikro, patah ulet ditandai dengan adanya profil *dimple* pada permukaan patahnya yang disebabkan oleh penjalaran retakan mikro (*micro voids coalescence*). Sedangkan patah getas ditandai dengan salah satu dari fenomena berikut:

- a. Patahan melintasi butiran atau patah transgranular, dikenal dengan nama *cleavage*, ditunjukkan pada Gambar 2.20 (a)
- b. Patahan melewati batas butir atau patah intergranular, dikenal dengan nama *intergranular embrittlement*, ditunjukkan pada Gambar 2.20 (b)



Gambar 2. 20 Retakan dengan pola rambatan (a)Transgranular
(b) Intergranular (Colangelo, 1989)

2.12. Heat Treatment

Perlakuan panas adalah kombinasi operasi pemanasan dan pendinginan terhadap logam atau paduan dalam keadaan padat dengan waktu tertentu, dimaksudkan untuk memperoleh sifat tertentu (Rochman Rochiem 2009). Secara umum heat treatment dibagi dalam tiga tahap, yaitu:

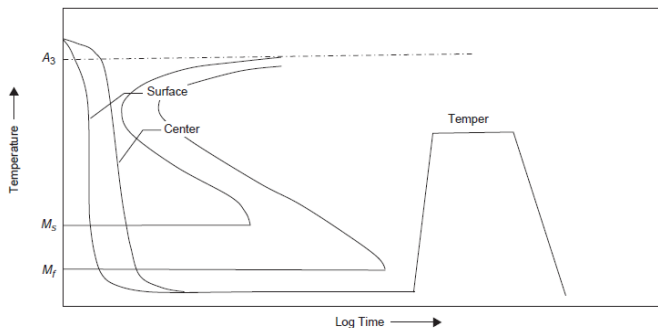
1. Pemanasan sampai suhu tertentu sesuai dengan proses heat treatment dan dengan kecepatan tertentu tergantung dari dimensi dan konduktifitas perpindahan panas benda kerja.
2. Mempertahankan suhu untuk waktu tertentu, sehingga temperaturnya merata pada seluruh bagian benda kerja.
3. Pendinginan dengan media pendingin yang bergantung pada proses heat treatment dan benda kerja. Pada baja karbon rendah dan sedang biasanya digunakan air sebagai media pendingin, karena laju pendinginannya cukup cepat sehingga terbentuk martensit. Sedangkan pada baja karbon tinggi dan baja paduan digunakan minyak sebagai media pendingin



dengan laju pendinginan yang lebih lambat. (Rina Dwi Yani 2008)

2.12.1. Hardening

Baja dikeraskan dengan austenitisasi, pendinginan cepat (quenching), dan kemudian tempering untuk mencapai kekerasan akhir. Baja memiliki komposisi yang berbeda-beda maka dari itu penting untuk memahami ketebalan maksimum yang dapat dikeraskan pada suatu media pendingin yang spesifik, misalnya air atau minyak, dan memperkirakan variasi kekuatan akhir dan keuletan yang dapat diperoleh pada temperatur tempering yang berbeda-beda. Prosedur untuk quenching dan tempering seperti pada Gambar 2.21. Tempering tidak digunakan untuk mengeraskan baja. Baja dikeraskan dengan austenitisasi dan quenching. Tempering dilakukan untuk mengembalikan keuletan yang hilang saat dikeraskan dan biasanya penghalusan (softening) diperoleh dengan tempering.



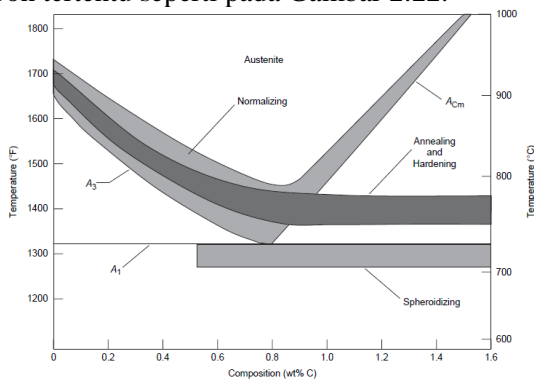
Gambar 2. 21 Perlakuan panas Hardening-tempering pada baja (Campbell 2008)

Kandungan karbon sangat penting terhadap kemampuan suatu baja untuk dikeraskan. Keuletan berkurang dengan meningkatnya kandungan karbon, kandungan karbon pada umumnya dijaga sekitar 0,45% pada baja teknik. Penambahan unsur paduan akan menggeser hidung diagram TTT ke kanan,

sehingga mempermudah benda kerja yang tebal untuk dikeraskan. Unsur paduan tidak meningkatkan kekerasan martensit secara signifikan, tetapi hardenability, kedalaman dari permukaan struktur mikro martensit dapat dihasilkan pada baja (Campbell 2008).

2.12.2. Austenitisasi

Pada proses austenitisasi, baja dipanaskan sampai daerah austenit (γ) dan ditahan selama beberapa waktu tertentu untuk melarutkan karbida sampai menjadi larutan padat austenit. Temperatur yang dibutuhkan untuk melakukan austenitisasi pada kadar karbon tertentu seperti pada Gambar 2.22.



Gambar 2. 6 Rentang temperatur austenitisasi pada perlakuan panas (Campbell 2008)

Peningkatan kadar karbon, temperatur berkurang sepanjang garis A_3 sampai mencapai minimum pada A_1 , komposisi eutektoid (0,8%), dan kemudian meningkat sepanjang garis A_{cm} . Tahap pertama pada pembentukan austenit adalah nukleasi dan pertumbuhan austenit dari perlit (ferit+ Fe_3C). Pembentukan austenit yang homogen dapat dipercepat dengan meningkatkan temperatur dan meningkatkan kehalusan partikel karbida mula-mula. Meskipun begitu, temperatur austenitisasi perlu dijaga serendah mungkin untuk mengurangi retak dan distorsi,



mengurangi oksidasi dan dekarburisasi, dan mengurangi pertumbuhan butir.

Temperatur yang dibutuhkan untuk mencapai 100% austenit padaa baja hipereutektoid cukup tinggi, meskipun begitu austenit untuk pengerasan pada baja dapat diperoleh pada temperatur sekitar 770°C. Karbida yang tidak terlarut dalam jumlah kecil memiliki pengaruh yang kecil pada sifat mekanik akhir baja (Campbell 2008).

2.12.3. Cooling

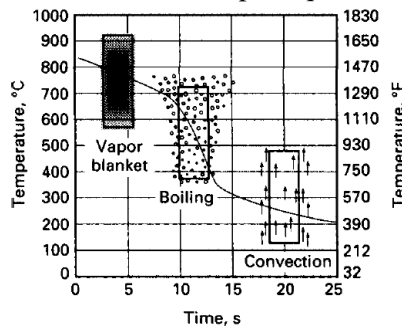
Proses perlakuan panas *hardening* dilakukan dengan memanaskan baja hingga mencapai temperatur austenitisasi, ditahan beberapa waktu tertentu pada temperatur tersebut, lalu didinginkan dengan cepat (*quenching*), sehingga diperoleh martensit. Pada suatu benda kerja yang dikeraskan maka kekerasan yang terjadi akan tergantung pada seberapa banyak martensit yang terbentuk dan kekerasan martensit itu sendiri. Banyaknya martensit yang akan terjadi tergantung pada seberapa banyak austenit yang terjadi pada saat pemanasan dan seberapa cepat pendinginannya sedangkan kekerasan martensit tergantung pada kadar karbon dalam baja yang terlarut dalam austenit.

Pada saat baja didinginkan secara cepat dari temperatur austenitisasi (*quench*), karbon tidak memiliki waktu untuk berdifusi dari struktur mikro austenit ketika struktur ni bertransformasi menjadi BCT (*Body Centered Tetragonal*), struktur ini disebut martensit. Proses *quenching* merupakan proses mendinginkan pada laju pendinginan tertentu untuk membentuk martensit. Distorsi struktur BCT menghasilkan kekuatan dan kekerasan yang tinggi pada baja yang di-*quench*. Beberapa baja di-*quench* dengan air atau oli untuk menghasilkan laju pendinginan yang cukup. Pendinginan dengan air menghasilkan laju pendinginan tercepat juga menghasilkan tegangan sisa yang paling tinggi sehingga dapat menghasilkan distorsi dan retak.

Terdapat tiga tahapan hilangnya panas selama *quenching* pada media liquid, seperti pada Gambar 2.23, yaitu *vapor blanket*,

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

nucleate boiling, dan *liquid cooling*. Tahap *vapor blanket* memiliki karakteristik dengan uap air menyelimuti benda kerja. Hal ini terjadi karena suplai panas dari bagian dalam benda kerja yang menuju permukaan melebihi jumlah panas yang dibutuhkan untuk menguapkan *quenchant* dan menghasilkan fasa uap air. Laju pendinginan tertinggi terjadi pada tahap *nucleate boiling*. Selama periode ini uap air terlepas dan laju ekstraksi panas yang dihasilkan berhubungan dengan pendidihan inti (*nucleate boiling*) dari *quenchant* pada logam. Panas secara cepat dilepas dari permukaan akibat kontak cairan pendingin pada logam dan kemudian menguap. Tahap *liquid cooling* dimulai ketika temperatur permukaan logam berkurang sampai dibawah titik didih cairan *quenching*. Dibawah temperatur ini, pendinginan terjadi dengan mekanisme konduksi dan konveksi pada *quenchant*.



Gambar 2. 23 Tiga tahapan pada quenching (ASM Handbook, Vol 04, Heat Treatment, 1998)

2.12.4. Tempering

Tempering adalah proses pemanasan kembali baja yang telah dikeraskan sampai temperatur dibawah temperatur kritis terendah (A_1), lalu didinginkan pada laju yang diinginkan. Proses ini bertujuan untuk mengembalikan sebagian keuletan/ketangguhan, berakibat turunnya kekerasan, dan melepas tegangan dalam untuk memperoleh keuletan yang lebih baik (Donald S Clark 1962). Struktur martensit dihasilkan dari proses *quenching*, maka dari itu ada tegangan internal besar, diperoleh dari



transformasi martensit, sehingga keuletan berkurang. *Tempering* dapat meningkatkan keuletan dan ketangguhan, yang sangat penting untuk meningkatkan penyerapan energi impak dan struktur martensit temper menghasilkan kekuatan dinamik yang baik pada baja (LI Hong-ying 2013)

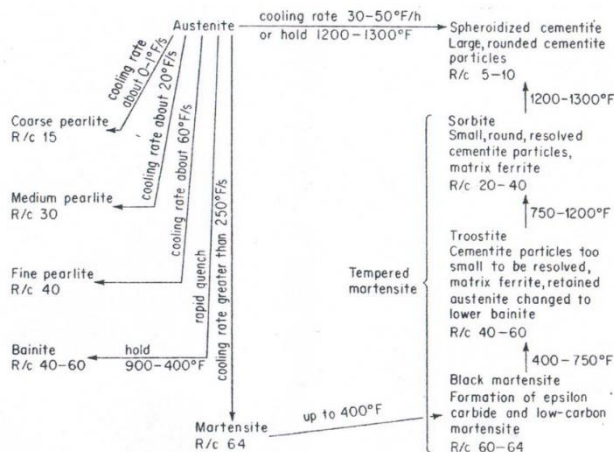
Martensit merupakan suatu struktur yang metastabil, bila dipanaskan kembali secara bertahap karbon yang terperangkap dalam struktur BCT dari martensit tersebut akan keluar menjadi karbida sehingga BCT akan menjadi BCC, ferrit. Proses pemanasan kembali dan pendinginan lambat yang mengikutinya dinamakan *tempering*.

Tempering dilakukan dengan memanaskan suatu baja yang memiliki struktur mikro martensit sampai temperatur dibawah eutektoid dalam waktu tertentu. Pada umumnya *tempering* dilakukan pada temperatur antara 250 dan 650°C, meskipun tegangan internal dapat lepas pada temperatur sekitar 200°C. Perlakuan panas melalui mekanisme difusi, pembentukan martensit temper seperti reaksi dibawah ini,

martensit (BCT, fasa tunggal) \rightarrow martensit temper ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$)

pada reaksi diatas fasa tunggal martensit BCT, yang jenuh dengan karbon, bertransformasi menjadi martensit temper, terdiri dari ferrit stabil dan fasa sementit (Callister 2007)

Perubahan struktur yang terjadi setelah proses *tempering* pada pemanasan temperatur tertentu, secara skematik digambarkan pada Gambar 2.24.

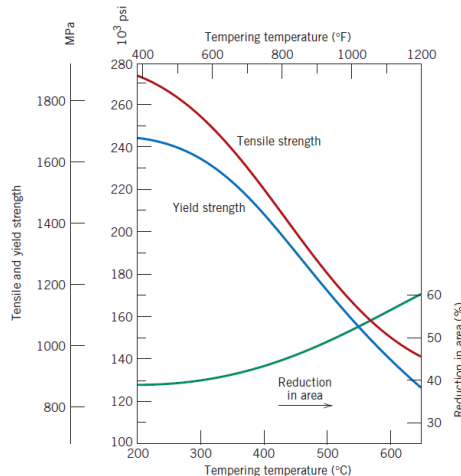


Gambar 2. 7 Skema produk transformasi austenit pada pendinginan dan transformasi martensit pada pemanasan (Tempering) (Avner 1974)

Pada temperatur temper yang masih rendah, di bawah 205°C, karbon yang keluar masih sangat sedikit, karbida yang terjadi, dinamakan karbida epsilon (ϵ carbide), masih sangat kecil, belum tampak di mikroskop (*submicroscopic*), martensit tampak lebih hitam, dinamakan *black martensite*. Pada tahap ini terjadi penurunan tegangan dalam, sedang kekerasan hampir tidak berkurang (masih 60 – 64 HRC), bahkan dapat terjadi sedikit kenaikan (untuk baja dengan kadar karbon tinggi). Pada temperatur temper yang lebih tinggi, 205 – 400 °C, karbida epsilon mulai berubah menjadi sementit, Fe_3C , dan austenit sisa bertransformasi, menjadi bainit atau martensit. Struktur yang terjadi dinamakan *troostite*, terdiri dari partikel sementit yang sangat halus (*submicroscopic*) dengan matriks ferrit dan austenit yang telah bertransformasi. Mulai tampak penurunan kekerasan (40 – 60 HRC) dan kenaikan keuletan yang berarti. Pada temperatur temper yang lebih tinggi lagi, 400 – 650 °C, sementit tumbuh menjadi lebih besar, berbentuk spheroid yang halus dan BCT menjadi BCC sempurna. Struktur ini dikenal dengan nama *sorbite*, terdiri dari



spheroid sementit yang sangat halus yang tersebar dalam matriks ferrit, kekerasan lebih rendah (20 – 40 HRC) dan keuletan/ketangguhan makin tinggi. Bila pemanasan diteruskan lebih tinggi lagi spheroid sementit tumbuh lebih besar dengan matriks ferrit. Struktur ini sama dengan yang diperoleh dengan proses spheroidisasi, kekerasannya rendah (5 – 10 HRC) dan keuletan/ketangguhannya tinggi. Sebenarnya perubahan struktur selama penemperan sangat gradual, sehingga tidak jelas perbedaan struktur yang satu dengan yang berikutnya. Karenanya ada yang menamakan semua produk dekomposisi martensit ini sebagai *martensit temper*. Karbon yang keluar dari struktur martensit maka tegangan didalam BCT akan berkurang sehingga kekerasan/kekuatannya juga berkurang selain itu keuletan/ketangguhan semakin meningkat. Secara umum dapat dikatakan bahwa bila temperatur penemperan makin tinggi maka kekerasannya akan makin rendah (Avner 1974). Pengaruh temperatur penemperan terhadap sifat mekanik seperti pada gambar 2.25.



Gambar 2. 8 Hubungan temperatur tempering pada kekuatan luluh dan tarik dan keuletan (%RA) (pada temperatur kamar) untuk paduan baja 4340 oil quench (Callister 2007)

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



Pada proses temper, kekerasan setelah temper tidak hanya tergantung pada temperatur temper tetapi juga pada waktu tahan pada temperatur tersebut. Hubungan antara temperatur dan waktu tahan dinyatakan sebagai *Hollomon-Jaffe parameter* (HJP). Parameter ini pada umumnya digunakan pada analisa parameter *tempering* martensit dan analisis evolusi sifat mekanik selama *tempering*. Persamaan *Hollomon-Jaffe* seperti persamaan (1) dibawah ini.

$$HJP = T(\log(t) + C) \quad (1)$$

Dimana T adalah temperatur *tempering* dalam Kelvin, t adalah waktu dalam jam, dan C adalah konstanta material, pada baja C bernilai 20. (Avner 1974).

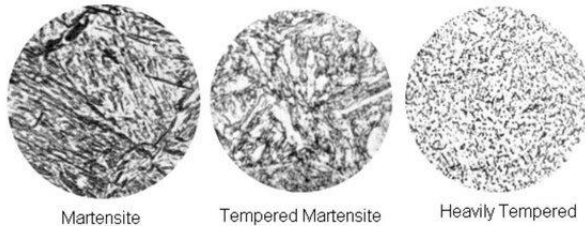
2.12.5. *Tempering* pada Martensite

Martensit adalah keras sehingga tidak bisa dipakai sebagian besar aplikasi. Disamping itu tegangan internal karena proses quenching juga memberikan efek perlemahan. Ketangguhan dan keuletan martensit bisa ditingkatkan dan tegangan internal bisa dibuang dengan cara perlakuan panas yang disebut *tempering*.

Tempering dilakukan dengan memanaskan baja martensit sampai temperatur dibawah eutectoid pada periode waktu tertentu. Biasanya *tempering* dilakukan pada temperatur antara 250-650 °C. Tegangan internal akan hilang pada temperatur $\pm 200^\circ\text{C}$.

Foto struktur mikro *tempered* martensite sama dengan spheroidit hanya partikel sementit lebih banyak dan lebih kecil. *Tempered* martensit mempunyai sifat sekeras dan sekuat martensit namun ketangguhan dan keuletan lebih baik.

Perbedaan Martensite, *Tempered* Martensite dan Heavily *Tempered* Gambar 2.26 (Mizhar 2011)



Gambar 2. 26 Perbedaan struktur mikro dari martensite, tempered martensite, dan heavily tempered (Mizhar 2011)

2.13. Pengujian Kekerasan

Pada umumnya, kekerasan menyatakan ketahanan terhadap deformasi dan merupakan ukuran ketahanan logam terhadap deformasi plastik atau deformasi permanen (Dieter 1987). Hal ini sering diartikan sebagai ukuran kemudahan dan kuantitas khusus yang menunjukkan nilai kekerasan material.

Pada pengujian kekerasan terdapat tiga jenis ukuran kekerasan, hal ini tergantung pada cara melakukan pengujian, yaitu:

1. Kekerasan goresan (*scratch hardness*),
2. Kekerasan lekukan (*indentation hardness*),
3. Kekerasan pantulan (*rebound*)

Pengujian yang sering dilakukan pada logam adalah pengujian kekerasan indentasi. Pada model ini kekerasan suatu material diukur terhadap tahanan plastis dari permukaan suatu material komponen konstruksi mesin dengan spesimen standart terhadap *indenter*. Terdapat berbagai macam uji kekerasan indentasi, antara lain: uji kekerasan *Brinell*, *Vickers*, *Rockwell*, dan *Knoop*.

Kekerasan dari besi cor umumnya cukup tinggi, sehingga untuk mendapatkan hasil yang maksimum, maka metode pengujian kekerasan yang cocok adalah dengan menggunakan *Brinell Hardness Testing*. (Murtiono 2012)



2.13.4. Uji Kekerasan Brinell

Uji brinell dilakukan dengan penekanan sebuah bola baja yang terbuat dari baja chrom yang telah dikeraskan dengan diameter tertentu, oleh gaya tekan secara statis kedalam permukaan logam yang diuji harus rata dan bersih. Setelah gaya tekan ditiadakan dan bola baja dikeluarkan dari bekas lekukan, maka diameter paling atas dari lekukan tadi diukur secara teliti untuk kemudian dipakai untuk penentuan kekerasan logam yang diuji dengan menggunakan rumus:

$$BHN = \frac{2P}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Dimana :

P = Beban yang diberikan (KP atau Kgf).

D = Diameter indenter yang digunakan.

d = Diameter bekas lekukan



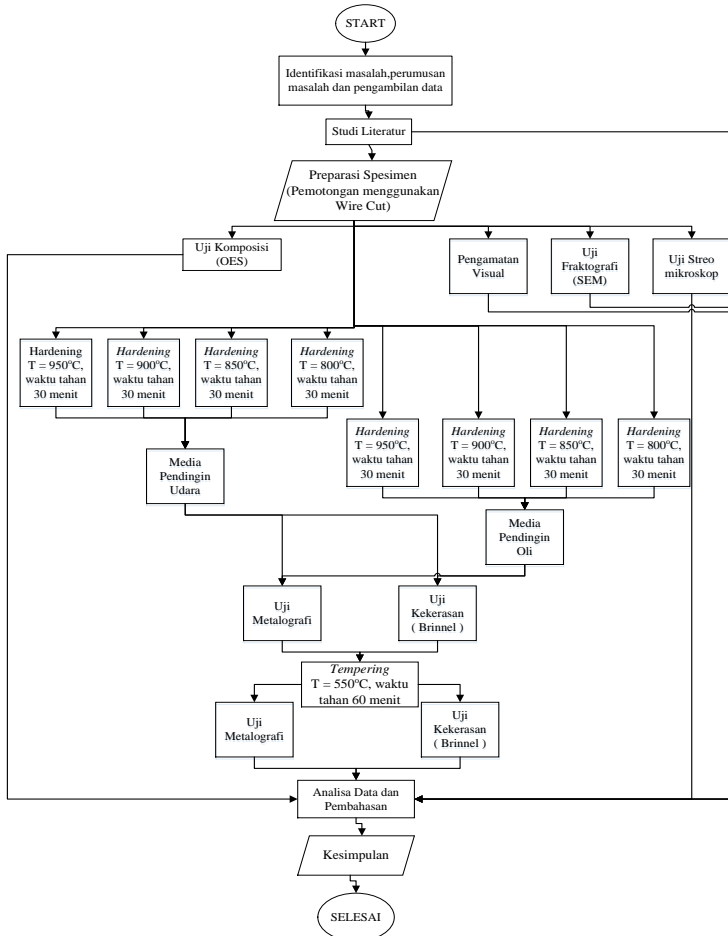
(Halaman ini sengaja dikosongkan)



BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Diagram Alir Penelitian

Pelaksanaan penelitian ini dilakukan seperti ditunjukkan dalam Gambar 3.1 dibawah ini



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian



3.2 Metode Penelitian

Metode Penelitian yang digunakan dalam penelitian kali ini antara lain studi lapangan, pengujian dan studi literature. Adapun hal-hal yang mencakup penelitian antara lain:

1. Studi lapangan

Metode ini mengacu pada pencarian informasi tentang komponen yang akan diteliti beserta informasi tentang kegagalan yang terjadi pada komponennya dengan cara terjun langsung ke lapangan yaitu PT. Semen Indonesia, dan berdiskusi dengan dosen mata kuliah, dosen pembimbing, dan pihak PT. Semen Indonesia yang ahli dibidangnya.

2. Studi Literatur

Metode studi literatur mengacu pada buku-buku, jurnal-jurnal penelitian, dan situs industri yang mempelajari tentang permasalahan analisa kegagalan pada *crossbar*.

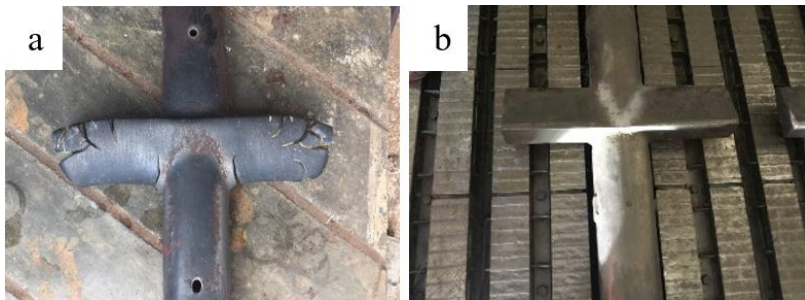
3. Pengujian

Metode ini dilakukan dengan pengujian langsung sesuai dengan prosedur dan metode yang ada. Adapun pengujian yang diperlukan dalam eksperimen ini yaitu : pengamatan bentuk *crack* dengan mikroskop stereo dan SEM, pengamatan mikro dengan mikroskop optik, uji komposisi dengan menggunakan spektrometer, uji kekerasan untuk mengetahui nilai kekerasan pada material *crossbar*.

3.3 Material yang digunakan

3.3.1. Material

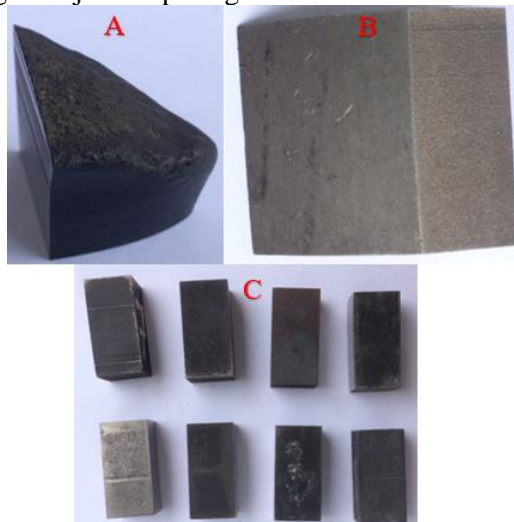
Pada tanggal 21 Juli 2016 ditemukan *crossbar* pada *clinker cooler* Pabrik Tuban 3 mengalami *crack* yang diperlihatkan pada Gambar 3.2 a dan pada Gambar 3.2 b merupakan *crossbar* yang masih mengalami kondisi yang baik.



Gambar 3. 2 a.) Komponen crossbar yang crack. b.) Bagian crossbar yang masih terpasang.

3.3.2. Spesimen

Spesimen yang digunakan dalam penelitian ini yaitu potongan pada komponen *crossbar* yang *crack*, 1 spesimen untuk pengujian kekerasan jauh dari *crack* dan 8 spesimen untuk proses perlakuan panas yang ditunjukkan pada gambar 3.3.



Gambar 3. 3 (A) Spesimen potongan yang di indikasi ada initial crack (B) Spesimen untuk uji kekerasan jauh dari crack (C) Spesimen untuk proses perlakuan panas



3.4 Peralatan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

1. Penggaris
Digunakan untuk mengukur specimen.
2. Mesin Wire Cut
Digunakan untuk memotong spesimen.
3. Kamera Digital
Digunakan untuk mendapatkan informasi kegagalan secara makro dan dokumentasi selama penelitian. Kamera yang digunakan adalah merk Canon dengan tipe kamera *mirrorless* seperti pada Gambar 3.4.



Gambar 3. 4 Kamera Digital

4. Mesin OES (*Optical Emission Spectroscopy*)
Digunakan untuk mengetahui komposisi material uji.
5. Hardness Test
Digunakan untuk mengetahui nilai kekerasan dari material uji. Mesin uji kekerasan ditunjukkan pada Gambar 3.5



Gambar 3. 5 Universal Hardness Tester

6. Amplas SiC grade 80 hingga 2000
Digunakan untuk preparasi pengujian mikroskop optik. Amplas yang digunakan adalah amplas jenis SiC dengan grade 80 hingga 2000.
7. Mesin Polish
Digunakan untuk preparasi pengujian mikroskop optik.
8. Larutan Etsa Nital 74a dan 78
Digunakan untuk preparasi pengujian metalografi. 74a terdiri dari 1-5 mL HNO_3 + 100 mL ethanol (95%) atau methanol (95%). 78 terdiri dari 10g potassium metabisulfite + 100mL *aquades*.
9. Mikroskop Streo
Digunakan untuk mendapatkan informasi struktur mikro/fasa yang terdapat pada material uji. Streo Microscope ditunjukkan pada Gambar 3.6.



Gambar 3. 6 Streo Microscope

10. Mesin SEM –EDX
Digunakan untuk mendapatkan informasi kegagalan secara topografi permukaan. Tipe mesin SEM-EDX yang digunakan adalah *SEM-EDX FEI type Inspect S-50* ditunjukkan pada Gambar 3.7.



Gambar 3. 7 Mesin SEM – EDX FEI type Inspec S-50

3.5 Tahapan Penelitian

3.5.1 Review Dokumen Perusahaan

Review dokumen perusahaan dilakukan untuk mendapatkan data data perusahaan yang berkaitan dengan *crossbar* sebagai pendukung hasil penelitian, berikut data yang harus diambil, yaitu:

1. Desain *crossbar*
2. Data operasi
3. Spesifikasi material
4. *Maintenance record*

3.5.2 Preparasi Spesimen

Tahap Persiapan ini diperlukan sebelum melakukan pengujian untuk menentukan penyebab kegagalan/*crack crossbar* pada PT Semen Indonesia. Persiapan ini berupa proses *cutting* menggunakan *wire cut* dengan ukuran dimensi 10x10x10 mm.

Proses pemotongan dilakukan pada bagian tengah *crossbar* yang terindikasi adanya konsentrasi tegangan. Spesimen yang terindikasi adanya konsentrasi tegangan bagian yang jauh dari *crack*/retakan akan diuji sebagai perbandingan antara material yang baru dengan material yang sudah *crack*/gagal.

3.5.3 Uji Komposisi

Pengujian komposisi kimia adalah untuk mengetahui komposisi kimia yang terdapat pada komponen yang mengalami kegagalan. Pada identifikasi komposisi kimia menggunakan alat

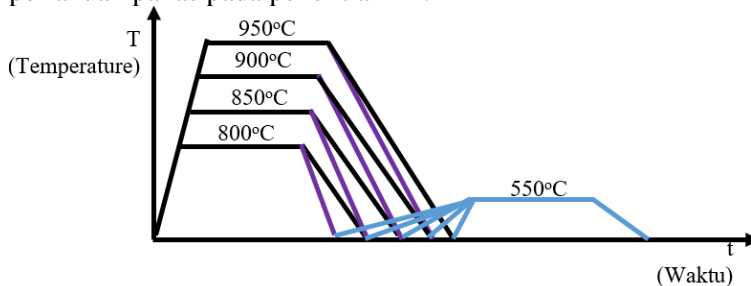
BAB III METODOLOGI PENELITIAN



Optical Emission Spectroscopy (OES) di Laboratorium Balai Riset Standarisasi Surabaya (Baristan) untuk mengetahui komposisi yang ada pada *Crossbar*.

3.5.4 Proses Perlakuan Panas

Perlakuan panas yang dilakukan adalah dengan proses *hardening*, material dipanaskan hingga temperatur 950°C, 900°C, 850°C, 800°C selama 30 menit kemudian di *quenching* dengan media pendingin yang berbeda – beda antara lain udara dan air kemudian di *Tempering* pada temperatur 550°C selama 60 menit dengan media pendingin udara. Gambar 3.8 menunjukkan perlakuan panas pada penelitian ini.



Gambar 3. 8 Proses *hardening* dengan variasi temperatur dan media pendingin

3.5.5 Pengamatan Makroskopik dan Mikroskopik

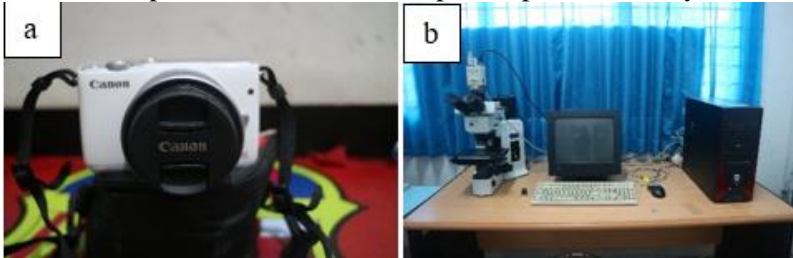
Pengamatan makro dilakukan untuk mengetahui bentuk, tampilan dan lokasi komponen yang mengalami kegagalan secara makro. Pengamatan makro dilakukan menggunakan kamera dan mikroskop stereo.

Adapun perlakuan terhadap sampel material sebagai berikut:

1. Melakukan pengambilan fotografi dengan kamera *mirrorless* seperti pada Gambar 3.9.a untuk mendapatkan informasi bentuk dari kegagalan secara makro.



2. Pengamatan melalui *stereo microscope* seperti pada Gambar 3.9.b terhadap sampel material dengan beberapa kali perbesaran untuk mendapatkan profil makronya



Gambar 3. 9 (a) Kamera merk Canon tipe Mirrorless.
(b)Stereomicroscope

3.5.6 Pengamatan Mikroskopik

Pada pengamatan Mikroskopik dilakukan dengan menggunakan alat, yaitu :

Scanning Elektron Mikroskop (SEM)

SEM (*Scanning Electron Microscope*) adalah sebuah mikroskop elektron yang didesain untuk menganalisa permukaan dari objek solid secara langsung. Mesin SEM ditunjukkan pada Gambar 3.10.

Langkah-langkah yang dilakukan dalam *fractography* menggunakan SEM adalah sebagai berikut :

1. Spesimen yang telah dipotong dibersihkan dengan hati-hati menggunakan *blower* untuk menghilangkan debu dan pengotor ringan lainnya.
2. Spesimen diletakkan diatas holder yang sebelumnya telah dilekatkan dengan *carbon tape*. *Carbon tape* berfungsi untuk melekatkan *holder* dengan sampel
3. Spesimen yang telah berisi *holder* dimasukkan kedalam mesin SEM pada gambar 3.10 dan siap dilakukan proses pengamatan. Pada layar komputer akan tampak permukaan spesimen dengan berbagai perbesaran yang bisa diatur sesuai keinginan.



Gambar 3. 10 Mesin SEM –EDAX FEI type Inspect S-50

3.5.7 Uji Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui distribusi kekerasan dengan melakukan indentasi di beberapa titik pada sampel material. Pengujian ini dilakukan dengan metode Brinell dimana dalam pengujiannya memakai indenter bola baja, pembebanan sebesar 187.5 kgf dan waktu indentasi selama 15 detik. Pengujian ini menggunakan *Universal Hardness Tester HBRV 187.5A* di Laboratorium Metalurgi, Jurusan Teknik Material dan Metalurgi, ITS. Gambar 3.11. merupakan gambar dari mesin uji kekerasan.

Sebelumnya, sampel yang digunakan harus memiliki permukaan yang rata untuk menghindari cacat indentasi.



Gambar 3. 11 Universal Hardness Tester HBRV 187.5A



3.6 Rancangan Penelitian

Tabel 3. 1 Rancangan penelitian

Material	Temperatur (°C)	Media pendingin	Pengujian OES	Uji Metalografi	Uji Kekerasan	Pengujian SEM
<i>Failure Crossbar</i>	-	-	√	√	√	√
<i>Crossbar H950-AQ</i>	950	udara	-	√	√	-
<i>Crossbar H900-AQ</i>	900	udara	-	-	√	-
<i>Crossbar H850-AQ</i>	850	udara	-	-	√	-
<i>Crossbar H800-AQ</i>	800	udara	-	√	√	-
<i>Crossbar H950-OQ</i>	950	oli	-	√	√	-
<i>Crossbar H900-OQ</i>	900	oli	-	-	√	-
<i>Crossbar H850-OQ</i>	850	oli	-	-	√	-
<i>Crossbar H800-OQ</i>	800	oli	-	√	√	-
<i>Crossbar H950-AQ-T550t1h</i>	550	udara	-	√	√	-
<i>Crossbar H900-AQ-T550t1h</i>	550	udara	-	-	√	-
<i>Crossbar H850-AQ-T550t1h</i>	550	udara	-	-	√	-
<i>Crossbar H800-AQ-T550t1h</i>	550	udara	-	√	√	-
<i>Crossbar H950-OQ-T550t1h</i>	550	udara	-	√	√	-
<i>Crossbar H900-OQ-T550t1h</i>	550	udara	-	-	√	-
<i>Crossbar H850-OQ-T550t1h</i>	550	udara	-	-	√	-
<i>Crossbar H800-OQ-T550t1h</i>	550	udara	-	√	√	-



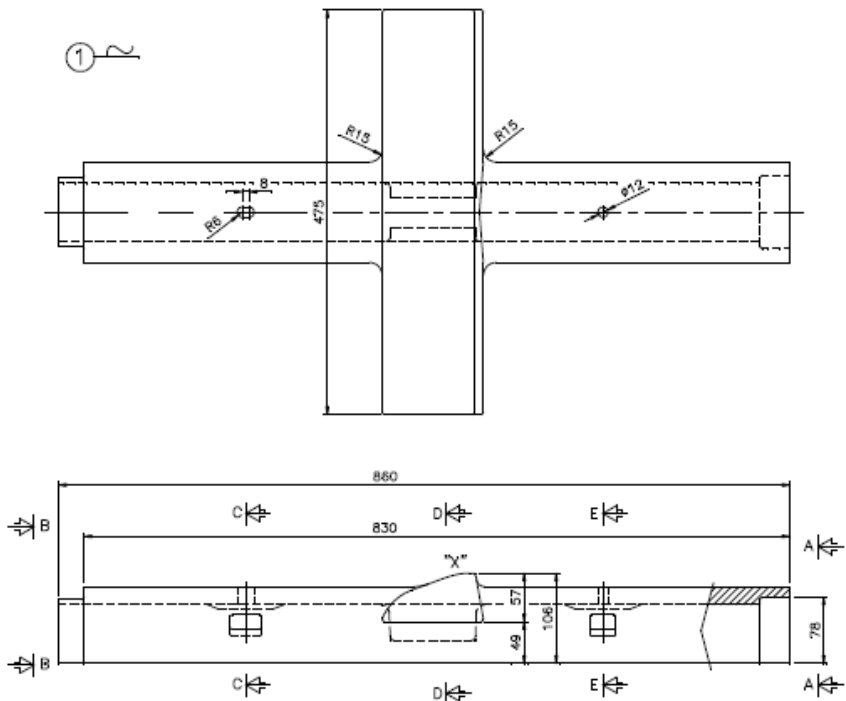
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1. Analisa Data Kegagalan Material

4.1.1. *Record Crossbar KJ210 di Clinker Cooler*

Pada bulan Juli 2016 PT. Semen Indonesia sedang melaksanakan maintenance rutin yang berlangsung selama 2 minggu. Kemudian di *Clinker Cooler* Tuban 3 ditemukan beberapa retakan dari *crossbar* yang merupakan komponen *clinker cooler*. Berdasarkan desain dari FLSmidth komponen ini memiliki umur pakai selama 2 tahun dan hanya mampu bertahan selama 8 bulan.

Berikut ini data-data dari *crossbar* mencakup spesifikasi *crossbar* pada *clinker cooler*.



Gambar 4. 1 Desain crossbar di PT. Semen Indonesia

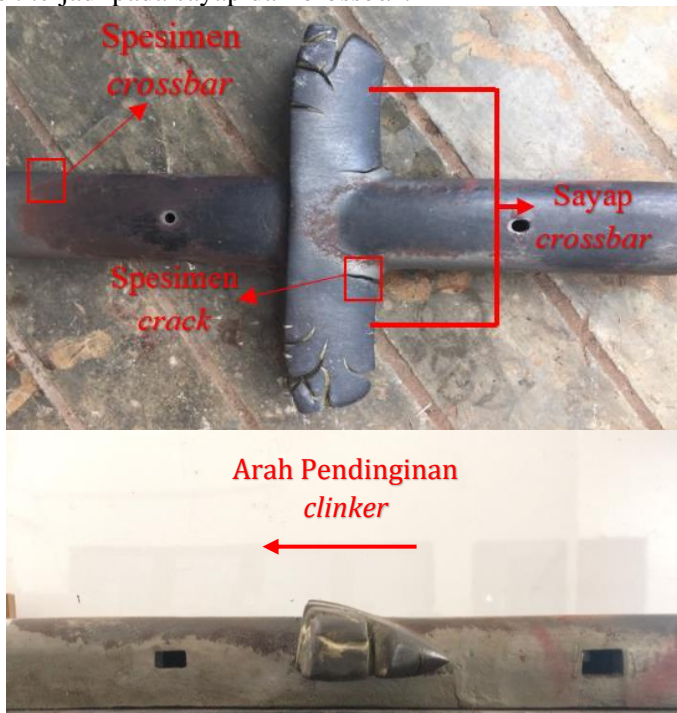


Tabel 4. 1 Data Operasi crossbar di clinker cooler Tuban 3 PT. Semen Indonesia

Produksi <i>clinker</i>	354 ton/jam
Temperatur <i>crossbar</i>	500°C – 600°C
Kecepatan Linear	1,45 km/jam
<i>Lifetime</i>	24 Bulan

4.1.2. Pengamatan Hasil Makro Pada *Crossbar* yang Gagal

Berdasarkan hasil pengamatan visual secara makro menggunakan bantuan kamera DSLR pada daerah komponen *crossbar* yang mengalami *crack* terlihat pada gambar 4.2. Terlihat *crack* terjadi pada sayap dari *crossbar*.



Gambar 4. 2 Crossbar yang mengalami kegagalan (a) Tampak atas (b) Tampak samping

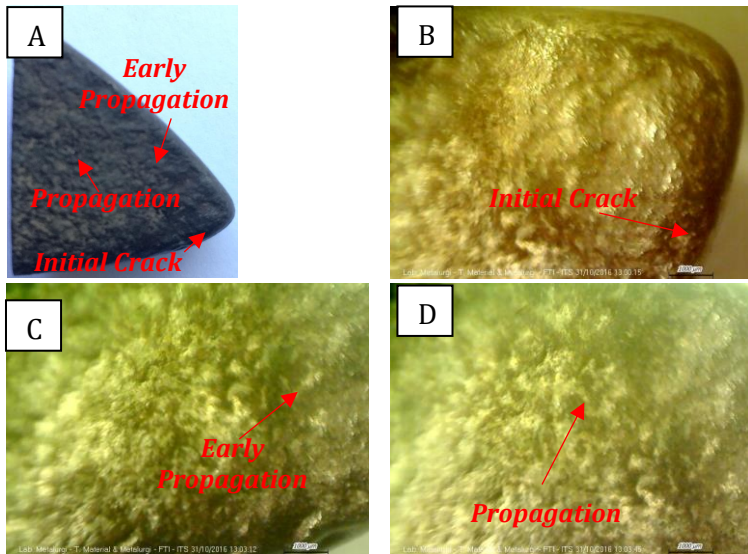


Gambar 4. 3 Pengamatan makro komponen crossbar gagal
(*crack*)

Gambar 4.3. menunjukkan kegagalan pada *crossbar* bermula dari ujung sebelah kanan dan menjalar kekiri. Lalu kemudian dapat ditentukan Pada gambar 4.3. dibagi menjadi 3 daerah yaitu retak awal (*initial crack*) pada daerah X, awal penjalaran retak (*crack propagation*) pada daerah Y, dan penjalaran retak ditunjukkan pada daerah Z tetapi pada daerah Z tidak mengalami *final crack*.

4.1.3. Hasil *Streomicroscope* Pada *Crossbar* yang Gagal

Berdasarkan pengamatan dengan menggunakan *stereomicroscope* dengan perbesaran yang lebih besar dari kamera DSLR sehingga retakan tampak jelas. Gambar 4.4 (a) merupakan hasil foto permukaan dari *crossbar* yang mengalami *crack* difoto menggunakan bantuan Kamera DSLR dan gambar 4.4 (b), (c), dan (d) menggunakan *stereomicroscope* dengan perbesaran 10 kali.



Gambar 4. 4 Observasi stereomiskroskop bagian penampang retakan (*crack*)

Gambar 4.4 (a) merupakan hasil foto permukaan dari *crossbar* yang mengalami *crack* difoto menggunakan bantuan Kamera DSLR, dari gambar 4.4 (a) terlihat bahwa terdapat 3 bagian yaitu *initial crack*, *early propagation*, dan *propagation*. Gambar 4.4. (b) merupakan hasil gambar menggunakan *stereomicroscope* dengan perbesaran 10 kali, dari gambar 4.4. (b) menunjukkan adanya awal retak (*crack initiation*) ditunjukan tanda panah yang kemudian arah retakaannya menjalar ke samping kanan atas kemudian menjalar ke kiri. Terlihat pada gambar 4.4. (b) *crack initiation* memiliki butiran lebih halus dibandingkan dengan *early crack propagation*. Gambar 4.4. (c) merupakan hasil gambar menggunakan *stereomicroscope* dengan perbesaran 10 kali, dari gambar tersebut menunjukkan awal penjalaran patah (*early crack propagation*) ditunjukan tanda panah yang kemudian arah retakaannya menjalar ke samping kiri. Hal ini terlihat pada *early crack propagation* memiliki butir yang lebih kasar jika

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

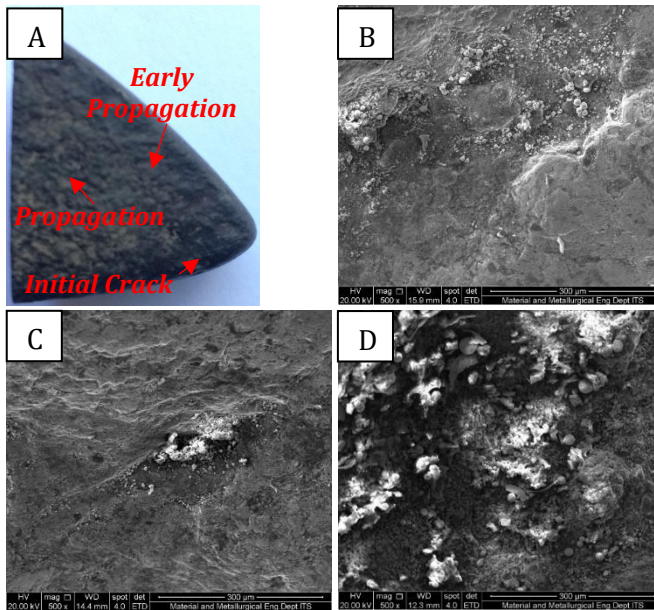


dibandingkan dengan *initial crack*. Gambar 4.4. (d) merupakan hasil gambar menggunakan *stereomicroscope* dengan perbesaran 10 kali, dari gambar tersebut menunjukkan penjalaran patahan (*propagation*). Hal ini terlihat pada *propagation* memiliki butir permukaan yang lebih kasar jika dibandingkan dengan *early crack propagation*. Pada skala makro juga di tunjukan adanya perubahan tinggi pada penampang komponen. Meninjau hasil pengamatan makro dengan menggunakan *stereomicroscope* tampak patahan yang terjadi pada permukaan *crossbar* dapat di kategorikan patah getas.

4.1.4. Hasil Pengujian SEM (*Scanning Electron Microscope*) Pada *Crossbar* yang Gagal

Berdasarkan pengamatan dengan menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) dengan perbesaran yang lebih besar dari kamera DSLR dan *stereomicroscope* sehingga retakan tampak jelas. Gambar 4.5 (a) merupakan hasil foto permukaan dari *crossbar* yang mengalami *crack* difoto menggunakan bantuan Kamera DSLR dan gambar 4.5 (b), (c), dan (d) menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) dengan perbesaran 500 kali.

Gambar 4.5 (a) merupakan hasil foto permukaan dari *crossbar* yang mengalami *crack* difoto menggunakan bantuan Kamera DSLR, dari gambar 4.5 (a) terlihat bahwa terdapat 3 bagian yaitu *initial crack*, *early propagation*, dan *propagation*. Gambar 4.5 (b) memperlihatkan daerah *initial crack* pada *crossbar* dengan menggunakan SEM perbesaran 500x. Di tandai dengan adanya permukaan yang lebih rendah dibandingkan permukaan yang lain. Daerah ini diambil tepat pada daerah sayap *crossbar*, yang mendapatkan pembebanan paling besar pada saat *crossbar* bekerja. Dari sini terlihat bahwa *crossbar* telah mengalami *fatigue crack brittle* dengan arah retakan yang tegak lurus dengan pembebanan. Pada daerah awal retak ini tidak terdapat *beachmark* dan striasi yang berarti komponen ini menerima beban dinamis lebih sedikit dibandingkan beban statisnya. Hal ini sesuai dengan sifat material yang memiliki kekuatan dan kekerasan yang tinggi.



Gambar 4. 5 Observasi SEM bagian penampang retakan (*crack*)

Gambar 4.5. (c) memperlihatkan daerah perambatan retak (*propagation*) pada *crossbar* yang mengalami kegagalan dimana terlihat adanya perbedaan ketinggian secara nyata dan juga warna yang lebih gelap dibandingkan daerah awal retak yang dapat dilihat pada gambar 4.5 (b) dan dengan SEM pada perbesaran 500x pada gambar 4.5. (c) daerah ini terlihat adanya sisa butiran butiran kasar yang merupakan ciri dari patah getas. Disini terlihat dengan Jelas patahan yang melintasi butiran atau patah transgranular. Patah Transgranular Ini ditandai dengan adanya pola patahan dipermukaan yang memiliki bentuk butir butir yang kasar dan tersebar acak di permukaan patahan. Namun pada gambar 4.5. (c) permukaan terlihat halus hal ini dikarenakan pada daerah ini *clinker* masuk dan menggerus permukaan *crossbar* yang patah sehingga menyebabkan permukaan pada daerah *propagation* menjadi halus. Gambar 4.5. (d) menunjukkan daerah dari

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN



perambatan (*propagation*) pada *crossbar* yang mengalami kegagalan. Dengan permukaan yang kasar dengan butir-butir yang kasar (*coarse grains*) yang terlihat pada hasil pengamatan dengan menggunakan *Scanning Electron Microscope (SEM)*.

4.1.5. Hasil Pengujian Komposisi Kimia Pada *Crossbar* yang Gagal

Uji Komposisi kimia menggunakan OES (*Optical Emission Spectroscopy*) pada komponen *crossbar*. Pengujian dilakukan untuk mengamati komposisi pada spesimen *crossbar* dan membandingkan dengan komposisi standard dari komponen *crossbar*. Hasil pengujian komposisi kimia *crossbar* yang mengalami *crack* dan komposisi standard ditunjukkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4. 2 Komposisi kimia material *crossbar* dan material standard

Material	Komposisi (wt%)								Fe
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Mo	Others	
Crossbar	1.17	2.48	0.93	0.02	0.06	16.34	0.33	4.27	Balance
Standard	2.7-4	1.8-3	0.8	0.07 Max	0.2	-	-	-	Balance

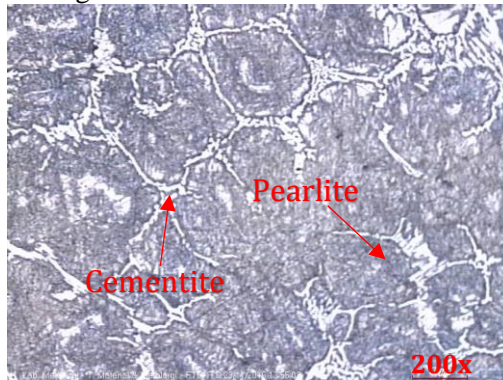
Tabel 4.2. menunjukkan komposisi kimia pada sampel uji dari *crossbar*, komposisi dari *crossbar* yang mengalami *crack* dan komposisi standar dari *crossbar*. Berdasarkan hasil pengujian komposisi diatas, menunjukkan komposisi dari *crossbar* yang mengalami *crack* tidak sesuai dengan material standar untuk *crossbar* yang seharusnya. Komposisi untuk *crossbar* yang semestinya yaitu ASTM A48. Komposisi standar untuk *crossbar* yang seharusnya dimana kadar karbonnya lebih dari 2% yang menandakan bahwa material tersebut besi cor. Oleh karena itu komposisi material *crossbar* yang ada di PT. Semen Indonesia ini tidak memenuhi standar dan mengalami *crack*. (ASTM A48, 1999)

4.1.6. Hasil Pengujian Metalografi Pada *Crossbar* yang Gagal

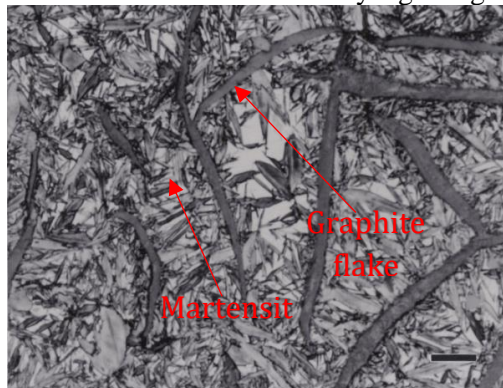
Pengujian struktur mikro dilakukan untuk mengetahui struktur awal yang terbentuk pada material *crossbar* sebelum



dilakukan perlakuan panas dan struktur awal dimana material mengalami *crack*. Pengamatan yang dilakukan dengan menggunakan mikroskop optik pada perbesaran 200x. Struktur mikro pada *crossbar* yang terlihat pada gambar 4.6 ini akan dibandingkan dengan struktur mikro *martensitic grey cast iron* yang merupakan standar dari *crossbar* pada umumnya yang ditunjukkan oleh gambar 4.7



Gambar 4. 6 Struktur Mikro *crossbar* yang mengalami *crack*



Gambar 4. 7 Struktur Mikro *Martensitic Grey Cast Iron* (ASTM A48)

Gambar 4.6. menunjukkan struktur mikro dari *crossbar* yang mengalami *crack*, berdasarkan pengamatan foto struktur mikro

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN



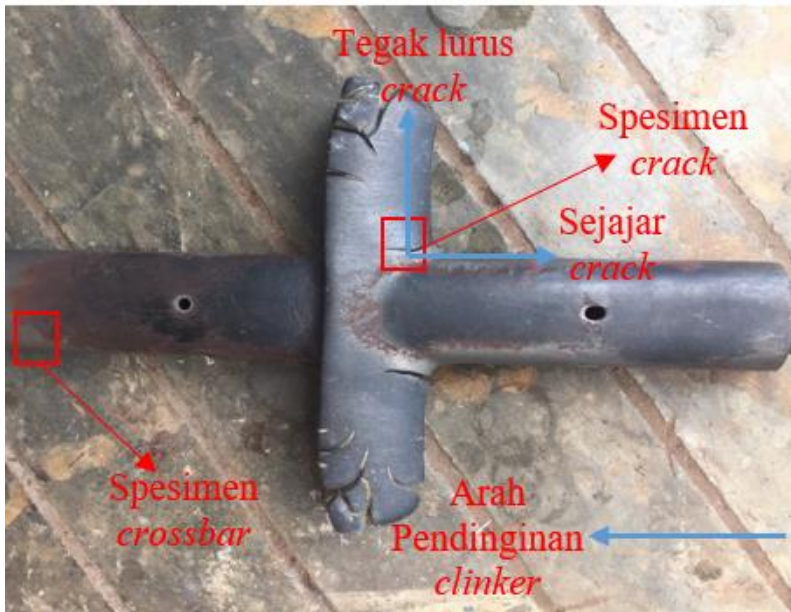
pada *crossbar* diatas diperoleh fasa yaitu *pearlite* dan *cementite*, dimana fasa tersebut ditunjukkan dengan warna hitam adalah fasa *pearlite* yang merupakan unsur utama *crossbar* yang mengalami *crack*. Selain itu terdapat juga bagian yang berwarna putih yaitu fasa *cementite*. Hal ini sesuai dengan struktur mikro pada material *hypereutectoid* yang memiliki kandungan karbon diatas 0.8%. (Aisyah, 2011)

Pada Gambar 4.7 menunjukkan struktur mikro pada material standar komponen *crossbar* yaitu *martensitic grey cast iron*. Pada gambar tersebut terlihat fasa *martensite* dan terdapan juga *graphite flake* yang merupakan ciri khas dari *grey cast iron*. (Subardi, 2011)

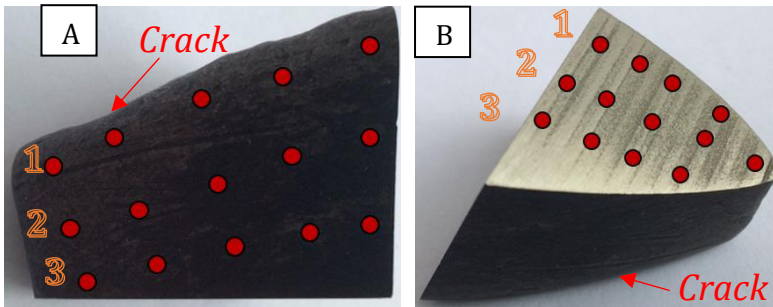
Dari dua gambar diatas dapat disimpulkan bahwa fasa yang terbentuk pada komponen *crossbar* yang gagal berupa *pearlite* dan *cementite*, berbeda dengan fasa yang terbentuk pada komponen *crossbar* yang sesuai standar yang menunjukkan fasa *martensite* dan *graphite flake*. Sehingga *crossbar* mengalami *crack* dikarenakan fasa yang terbentuk adalah *pearlite*. Mengingat bahwa struktur *martensite* adalah memiliki sifat kekerasan yang tinggi jika dibandingkan dengan *pearlite*. (Subardi, 2011)

4.1.7. Hasil Pengujian Kekerasan pada *Crossbar* yang Gagal

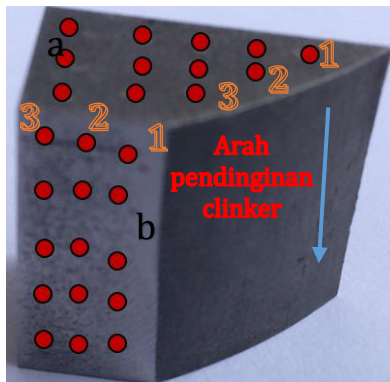
Pengujian *hardness* ini digunakan untuk mengetahui distribusi kekerasan pada *crossbar* yang mengalami kegagalan. Gambar 4.8 merupakan gambar dari *crossbar* yang mengalami *crack*, gambar 4.9 (a) dan Gambar 4.9 (b) merupakan daerah yang dekat dengan *crack*, dan Gambar 4.10 merupakan spesimen dari *crossbar*. Pengujian ini menggunakan indentasi sebanyak 10-15 titik secara merata, indentasi dilakukan pada daerah yang dekat dan jauh dari patahan dengan beban sebesar 187.5 kgf. Pembagian daerah indentasi dapat dilihat pada gambar 4.9. dan gambar 4.10.



Gambar 4. 8 Crossbar yang mengalami kegagalan



Gambar 4. 9 (a) Daerah indentasi sejajar dengan crack (b)
Daerah indentasi tegak lurus dengan crack



Gambar 4. 10 (a) Daerah indentasi tegak lurus arah pendinginan
(b) Daerah indentasi sejajar arah pendinginan

Pada gambar 4.9. dicantumkan daerah indentasi yang memiliki rata-rata kekerasan tertinggi. Dari gambar 4.9. bisa terlihat bahwa nilai kekerasan di daerah sejajar dengan *crack* memiliki rata-rata sebesar 405 BHN, di daerah tegak lurus dengan *crack* memiliki rata-rata sebesar 361,8 BHN, di daerah *crossbar* sejajar dengan arah pendinginan memiliki rata-rata sebesar 365,4 BHN dan di daerah tegak lurus dengan arah pendinginan memiliki rata-rata sebesar 355,8 BHN. Dari sini bisa dilihat bahwa komponen ini mengalami kenaikan kekerasan pada daerah yang mengalami patahan bila dibandingkan dengan daerah yang berada jauh dari patahan. Selain itu adanya perbedaan temperatur pada saat bekerja juga mempengaruhi kekerasan pada *crossbar*.

Pada tabel 4.3 dan tabel 4.4 diperlihatkan nilai kekerasan yang didapatkan pada daerah dekat dengan *crack* secara sejajar dan tegak lurus dan daerah *crossbar* sejajar dan tegak lurus dengan arah pendinginan.

Pada tabel 4.5. menunjukkan bahwa kekerasan yang sesuai dengan material *crossbar* adalah *grey cast iron* dengan type *heat treat hardened* yang memiliki nilai kekerasan sebesar 480-550 BHN dimana nilai kekerasannya jauh berbeda dari *crossbar* yang



ada di PT. Semen Indonesia yang memiliki nilai kekerasan rata-rata tertinggi sebesar 405 BHN.

Tabel 4. 3 Data Hasil Pengujian Kekerasan Dekat dari crack

Daerah Indentasi	Sejajar dengan crack			Tegak lurus dengan crack		
	1	2	3	1	2	3
1	408	390	370	-	365	-
2	416	398	379	368	368	368
3	400	384	366	360	358	354
4	402	386	368	363	360	362
5	399	380	360	355	358	355
Average	405	387,6	368,6	361,5	361,8	359,75

Tabel 4. 4 Data Hasil Pengujian Kekerasan Material

Daerah Indentasi	Tegak lurus arah pendinginan			Sejajar arah pendinginan		
	1	2	3	1	2	3
1	360	-	-	362	360	358
2	364	325	-	358	358	358
3	368	368	354	348	352	355
4	370	373	377	352	354	352
5	365	370	358	350	355	353
Average	365,4	359	363	354	355,8	355,2

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN



Tabel 4. 5 Nilai kekerasan crossbar sesuai ASTM A48

Type of Gray Cast Iron	Matrix Microstructure Around Flake Graphite	Brinell Hardness (BHN)
Soft-Annealed	All Ferrite	110-140
Ordinary	Pearlite and Ferrite	140-200
Higher Strength	Fine Pearlite	200-270
Alloyed-Arcicular	Bainite	260-350
Austenitic (Ni-Resist)	Austenite	140-160
Heat Treat Hardened	Martensite	480-550
Hardened and Tempered	Tempered Martensite	250-450
Chilled (White Iron)	Pearlite and Carbides	400-500

4.2. Hasil Proses Heat Treatment Pada *Crossbar* yang gagal

Hasil analisis kegagalan menunjukkan bahwa spesifikasi material pada komponen *crossbar* milik PT. Semen Indonesia (Persero) Tbk tidak sesuai dengan standar ASTM A48 *martensitic grey cast iron*. Pada penelitian ini dilakukan upaya heat treatment untuk memperbaiki sifat kekerasasn dari komponen tersebut agar mendekati standar yang seharusnya. Heat treatment dilakukan pada temperatur 950°C, 900°C, 850°C, 800°C dengan waktu tahan 30 menit menggunakan media pendingin udara dan oli. Setelah di *hardening* dilakukan proses *tempering* pada temperatur 550°C dengan waktu tahan 60 menit menggunakan media pendingin udara. *Tempering* dilakukan untuk mengkondisikan dengan kinerja *crossbar* pada pabrik yang bekerja pada temperatur 500°C-600°C.



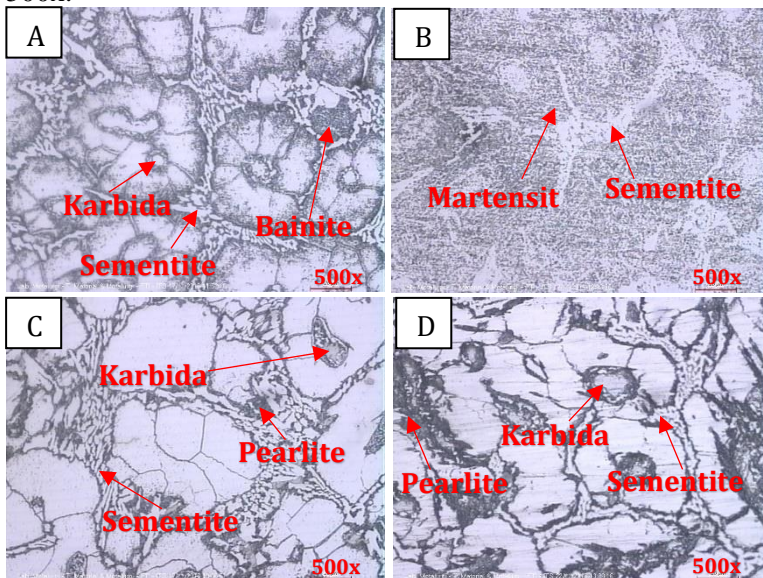
Tabel 4. 6 Kode spesimen

Kode Spesimen	Jenis Perlakuan Panas
<i>Failure Crossbar</i>	Komponen <i>crossbar</i> yang <i>crack</i>
Crossbar H800-AQ	Crossbar dengan Hardening temperatur 800°C + Air Quench
Crossbar H850-AQ	Crossbar dengan Hardening temperatur 850°C + Air Quench
Crossbar H900-AQ	Crossbar dengan Hardening temperatur 900°C + Air Quench
Crossbar H950-AQ	Crossbar dengan Hardening temperatur 950°C + Air Quench
Crossbar H800-OQ	Crossbar dengan Hardening temperatur 800°C + Oil Quench
Crossbar H850-OQ	Crossbar dengan Hardening temperatur 850°C + Oil Quench
Crossbar H900-OQ	Crossbar dengan Hardening temperatur 900°C + Oil Quench
Crossbar H950-OQ	Crossbar dengan Hardening temperatur 950°C + Oil Quench
Crossbar H800-AQ-T550t1h	Crossbar dengan Hardening temperatur 800°C Air Quench + Tempering temperatur 550°C
Crossbar H850-AQ-T550t1h	Crossbar dengan Hardening temperatur 850°C Air Quench + Tempering temperatur 550°C
Crossbar H900-AQ-T550t1h	Crossbar dengan Hardening temperatur 900°C Air Quench + Tempering temperatur 550°C
Crossbar H950-AQ-T550t1h	Crossbar dengan Hardening temperatur 950°C Air Quench + Tempering temperatur 550°C
Crossbar H800-OQ-T550t1h	Crossbar dengan Hardening temperatur 800°C Oil Quench + Tempering temperatur 550°C
Crossbar H850-OQ-T550t1h	Crossbar dengan Hardening temperatur 850°C Oil Quench + Tempering temperatur 550°C
Crossbar H900-OQ-T550t1h	Crossbar dengan Hardening temperatur 900°C Oil Quench + Tempering temperatur 550°C
Crossbar H950-OQ-T550t1h	Crossbar dengan Hardening temperatur 950°C Oil Quench + Tempering temperatur 550°C

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.2.1. Hasil Pengujian Metalografi Pada *Crossbar* Setelah di *Hardening* dan *Tempering*.

Pengujian struktur mikro dilakukan untuk mengetahui struktur akhir yang terbentuk pada material *crossbar* setelah dilakukan proses *hardening* dengan variasi pada temperatur dan media pendingin dan setelah dilakukan *tempering* dilakukan kembali pengujian struktur mikro untuk mengetahui perbedaan pada struktur mikro material *crossbar*. Pengamatan yang dilakukan yaitu dengan menggunakan mikroskop optik pada perbesaran 500x.



Gambar 4. 11 Foto mikrograf *failure crossbar* : (A) *crossbar* H950-AQ, (B) *crossbar* H950-OQ, (C) *crossbar* H800-AQ, (D) *crossbar* H800-OQ

Gambar 4.11 menunjukkan struktur mikro hasil proses pengerasan *crossbar*. Gambar 4.11 (A) menunjukkan struktur mikro hasil proses pengerasan spesimen *crossbar* H950-AQ pada temperatur 950°C selama 30 menit lalu didinginkan dengan media

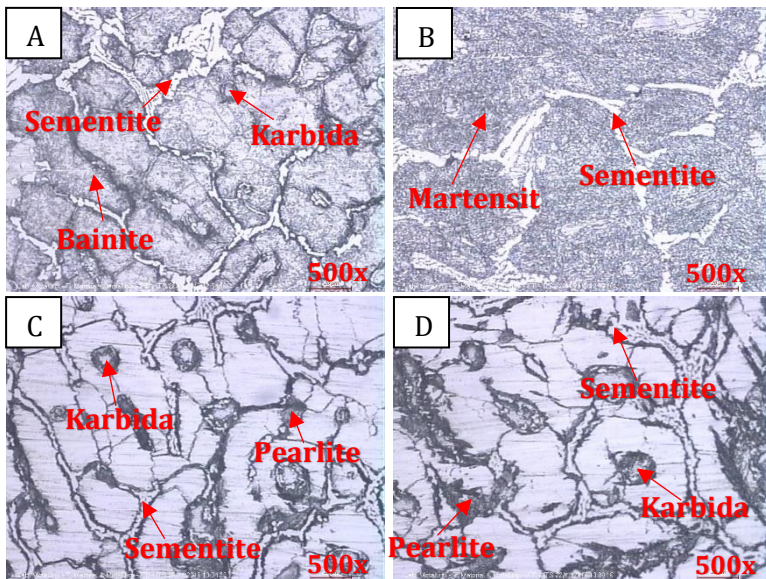


udara. Fasa yang terbentuk pada spesimen ini adalah bainit yang berwarna hitam, karbida Cr yang berwarna putih, dan sementite yang merupakan batas butir, bainit terbentuk karena transformasi austenite di bawah *nose* dan diatas martensite start akan menghasilkan bainit. Gambar 4.11 (B) menunjukkan struktur mikro hasil proses pengerasan spesimen *crossbar* H950-OQ pada temperatur 950°C selama 30 menit lalu didinginkan dengan media oli. Fasa yang terbentuk pada spesimen ini adalah sementit yang merupakan batas butir dan martensite yang berwarna hitam, martensit terbentuk karena proses pendinginan non-ekuilibrium yang cepat atau sangat cepat pada temperatur austenitisasinya. Perbedaan ini disebabkan karena adanya perbedaan media pendingin yang digunakan. Gambar 4.11 (C) menunjukkan struktur mikro hasil proses pengerasan spesimen *crossbar* H800-AQ pada temperatur 800°C selama 30 menit lalu didinginkan dengan media udara. Fasa yang terbentuk pada spesimen ini adalah pearlite yang berwarna hitam, karbida Cr yang berwarna putih, dan sementite yang merupakan batas butir. Gambar 4.11 (D) menunjukkan struktur mikro hasil proses pengerasan spesimen *crossbar* H800-AQ pada temperatur 800°C selama 30 menit lalu didinginkan dengan media udara. Fasa yang terbentuk pada spesimen ini adalah pearlite yang berwarna hitam, karbida Cr yang berwarna putih, dan sementite yang merupakan batas butir. Hardening pada temperatur 800°C, *crossbar* belum memasukin fasa austenisasi oleh karena itu fasa yang terbentuk sama seperti struktur awal *crossbar*.

Gambar 4.12 menunjukkan struktur mikro hasil proses tempering pada *crossbar* yang telah dilakukan proses hardening. Gambar 4.12 (A) menunjukkan hasil struktur mikro hasil proses tempering pada temperatur 550°C selama 60 menit lalu didinginkan dengan media udara pada spesimen *crossbar* H950-AQ-T550t1h yang telah dihardening dengan temperatur 950°C dengan media pendingin udara. Fasa yang terbentuk pada spesimen ini adalah bainit yang berwarna hitam, karbida Cr yang berwarna putih, dan sementite yang merupakan batas butir. Gambar 4.12 (B) menunjukkan hasil struktur mikro hasil proses tempering pada

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

temperatur 550°C selama 60 menit lalu didinginkan dengan media udara pada spesimen *crossbar* H950-OQ-T550t1h yang telah dihardening dengan temperatur 950°C dengan media pendingin oli. Fasa yang terbentuk pada spesimen ini adalah sementit yang merupakan batas butir dan martensite yang berwarna hitam. Gambar 4.12 (C) menunjukkan hasil struktur mikro hasil proses tempering pada temperatur 550°C selama 60 menit lalu didinginkan dengan media udara pada spesimen *crossbar* H800-AQ-T550t1h yang telah dihardening dengan temperatur 800°C dengan media pendingin udara. Fasa yang terbentuk pada spesimen ini adalah pearlite yang berwarna hitam, karbida Cr yang berwarna putih, dan sementite yang merupakan batas butir.



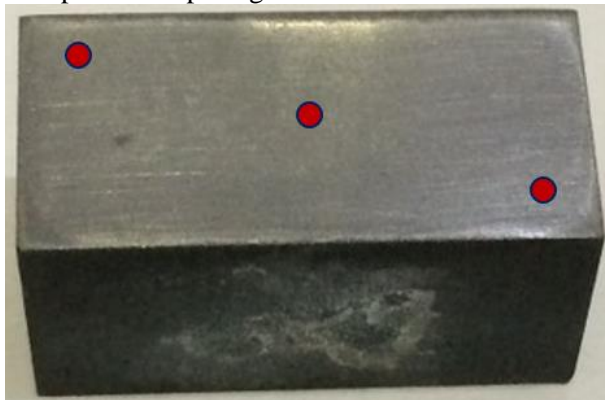
Gambar 4. 12 Foto mikrograf baja *failure crossbar*: (A) *crossbar* H950-AQ-T550t1h, (B) *crossbar* H950-OQ-T550t1h, (C) *crossbar* H800-AQ-T550t1h, (D) *crossbar* H800-OQ-T550t1h



Gambar 4.12 (D) menunjukkan hasil struktur mikro hasil proses tempering pada temperatur 550°C selama 60 menit lalu didinginkan dengan media udara pada spesimen *crossbar* H800-OQ-T550t1h yang telah dihardening dengan temperatur 800°C dengan media pendingin oli. Fasa yang terbentuk pada spesimen ini adalah pearlite yang berwarna hitam, karbida Cr yang berwarna putih, dan sementite yang merupakan batas butir.

4.2.2. Hasil Pengujian Kekerasan Pada *Crossbar* Setelah di *Hardening* dan Setelah di *Tempering*

Pengujian Kekerasan dilakukan pada permukaan spesimen tanpa perlakuan, pada setiap variasi temperatur *hardening*, dan pada setiap variasi media pendingin. Pengujian ini menggunakan indentasi sebanyak 3 titik, indentasi dilakukan secara *cross sectional* dengan beban sebesar 187.5 kgf. Pembagian daerah indentasi dapat dilihat pada gambar 4.12.



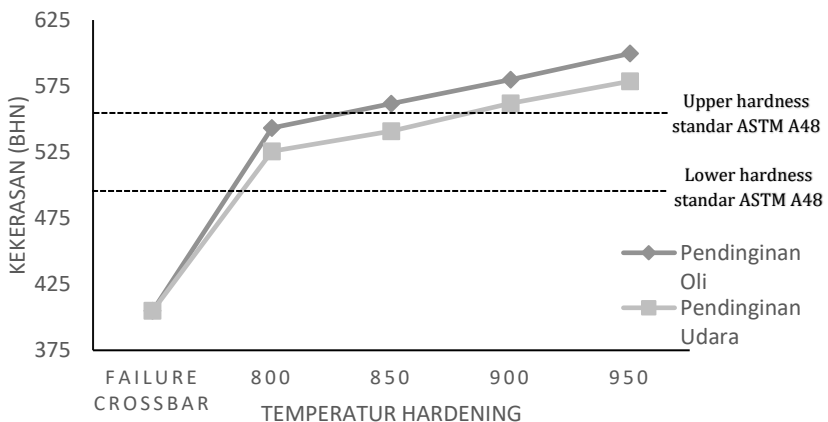
Gambar 4. 13 Daerah Indentasi Uji Kekerasan

Hasil Pengujian Kekerasan dapat dilihat pada tabel 4.7 dan tabel 4.8, serta grafik distribusi kekerasan yang ditunjukkan pada gambar 4.13.

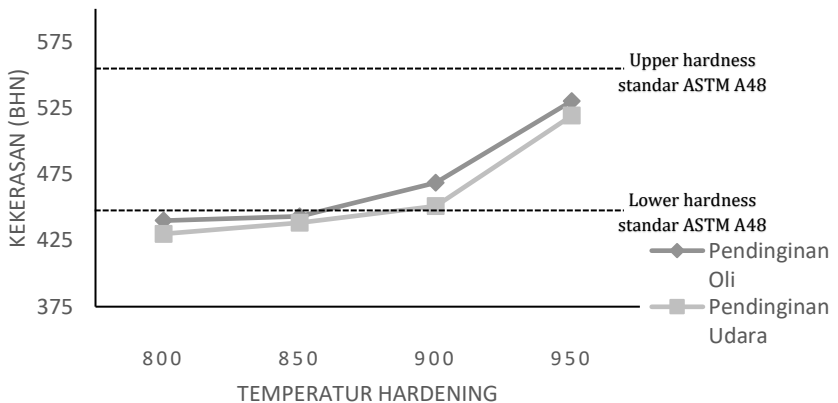


Tabel 4. 7 Hasil Pengujian Kekerasan pada *crossbar* yang telah di hardening dan tempering (BHN)

Nama Spesimen	Kekerasan (BHN)
<i>Failure Crossbar</i>	405
<i>Crossbar H800-AQ</i>	525,67 ± 3,21
<i>Crossbar H850-AQ</i>	541
<i>Crossbar H900-AQ</i>	562 ± 2
<i>Crossbar H950-AQ</i>	578,67 ± 3,05
<i>Crossbar H800-OQ</i>	543,33 ± 3,05
<i>Crossbar H850-OQ</i>	561,67 ± 1,53
<i>Crossbar H900-OQ</i>	580 ± 2,65
<i>Crossbar H950-OQ</i>	599,67 ± 3,79
<i>Crossbar H800-AQ-T550t1h</i>	430 ± 2
<i>Crossbar H850-AQ-T550t1h</i>	438,33 ± 1,53
<i>Crossbar H900-AQ-T550t1h</i>	451 ± 1
<i>Crossbar H950-AQ-T550t1h</i>	519,33 ± 3,21
<i>Crossbar H800-OQ-T550t1h</i>	440 ± 1
<i>Crossbar H850-OQ-T550t1h</i>	443,33 ± 3,05
<i>Crossbar H900-OQ-T550t1h</i>	468,67 ± 8,08
<i>Crossbar H950-OQ-T550t1h</i>	530,33 ± 4,93



Gambar 4. 14 Grafik sifat kekerasan hasil proses hardening baja *crossbar*



Gambar 4. 15 Grafik kekerasan material setelah proses tempering 550°C selama 60 menit

Dari tabel 4.3 didapatkan rata-rata kekerasan pada permukaan setiap sampel uji. Spesimen uji tanpa perlakuan (*as cast*) memiliki kekerasan 405 BHN pada permukaan dekat dengan crack. Spesimen uji setelah di hardening dengan temperatur hardening 800°C menggunakan media pendingin udara memiliki kekerasan paling rendah yaitu 525,67 BHN, sementara spesimen uji dengan temperatur hardening 800 °C menggunakan media pendingin oli memiliki kekerasan sebesar 543,33 BHN. Sedangkan kekerasan yang paling tinggi terdapat pada spesimen dengan temperatur hardening 950°C menggunakan media pendingin oli yaitu 599,67 BHN, sementara spesimen uji dengan temperatur hardening 950 °C menggunakan media pendingin udara yaitu 578,67 BHN. Kedelapan spesimen diatas memiliki kekerasan yang berbeda karena memiliki temperatur hardening yang berbeda serta laju pendinginan yang dihasilkan juga berbeda. (Cord Henrik Surberg, 2007)

Selama pendinginan, terjadi perpindahan panas antara spesimen dengan media pendingin. Kontak antara media pendingin dengan spesimen mengakibatkan perubahan temperature yang relative cepat dan berbeda-beda. Semakin cepat laju pendinginan

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN



yang terjadi maka akan semakin tinggi nilai kekerasan yang diperoleh pada spesimen. (Mohammad Ismanhadi S, 2013)

Setelah dilakukan hardening dilakukan tempering untuk mengkondisikan kondisi standard pada saat material beroperasi dan didapatkan nilai kekerasan yang paling tinggi pada spesimen yang dihardening dengan temperatur 950°C dengan media pendingin oli sebesar 530,33 BHN, selanjutnya dengan temperatur hardening 950°C menggunakan media pendingin udara yaitu 519,33 BHN. Sedangkan untuk kekerasan paling rendah setelah dilakukan tempering yaitu pada spesimen yang di hardening dengan temperatur 800°C dengan media pendingin udara yaitu 430 BHN, selanjutnya dengan temperatur hardening 800°C menggunakan media pendingin oli yaitu 440 BHN. Setelah mengalami proses tempering nilai kekerasan dari kedelapan spesimen menurun hal ini dikarenakan *tempering* bertujuan untuk mengembalikan sebagian keuletan/ketangguhan, berakibat turunnya kekerasan, dan melepas tegangan dalam untuk memperoleh keuletan yang lebih baik (Donald S Clark 1962)

4.2. Pembahasan

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan selama penelitian ini, faktor-faktor penyebab kegagalan dapat dibagi menjadi beberapa faktor, yaitu kesalahan pemilihan material dan pemakaian material.

Material standar untuk *crossbar* seharusnya memiliki komposisi seperti *martensitic grey cast iron* yang mempunyai sifat kekerasan yang tinggi yang sesuai dengan ASTM A48, sedangkan material *crossbar* yang digunakan oleh PT. Semen Indonesia (Persero) Tbk setelah di uji komposisi hasilnya tidak sesuai dengan komposisi standar ASTM A48 material *grey cast iron*. Jika dilihat dari segi komposisi yang berbeda seperti unsur carbon yang memiliki komposisi yang lebih rendah yaitu sebesar 1,17% dibandingkan dengan komposisi carbon standar ASTM A48 material *grey cast iron* yaitu sebesar 2,7 – 4 %. Sehingga material *crossbar* memiliki kekerasan dan kekuatan yang lebih rendah



dibandingkan dengan material *crossbar* sesuai standar ASTM A48. Untuk material *crossbar* PT. Semen Indonesia (Persero) Tbk juga memiliki kelebihan dengan adanya unsur cromium dengan komposisi tinggi sebesar 16,34%. Cromium merupakan unsur pembentuk karbida dan penstabil ferrit yang baik, dengan adanya cromium dapat menaikkan temperatur austenisasi karena cromium adalah unsur pembentuk karbida dan penstabil ferrit. Cromium juga dapat meningkatkan hardenability pada material *crossbar* PT. Semen Indonesia Tbk. Ditinjau dari komposisi cromium tersebut untuk perlakuan panas dibutuhkan temperatur austenisasi lebih tinggi dari temperatur A1 dan media pendinginnya cukup menggunakan oli atau udara untuk menghasilkan kekerasan maksimal. Perbedaan komposisi ini mengakibatkan material *crossbar* memiliki kekerasan yang lebih rendah sehingga lebih mudah mengalami *crack* dari *lifetime* yang seharusnya 2 tahun hanya bertahan selama 8 bulan saja jika ditinjau dari komposisi unsur yang jauh sekali dari standar ASTM A48. (A48, 1999).

Hasil pengamatan fraktografi menunjukkan bahwa *Initial Crack*, merupakan retak awal yang ditandai dengan permukaan yang terlihat terang dan halus. Menurut Nishida Shin-ichi (1992). Awal retak biasanya dimulai dari permukaan. Hal ini terjadi karena permukaan menerima beban terbesar dan paling memungkinkan terjadinya konsentrasi tegangan yang disebabkan oleh adanya perubahan dimensi pada permukaan atau proses pengerjaan tertentu pada material. Adanya cacat dalam juga menyebabkan konsentrasi tegangan. *Crack Propagation*, merupakan penjalaran retak dengan permukaan yang berwarna lebih gelap dan adanya perbedaan ketinggian yang terlihat secara makro bila dibandingkan dengan daerah *initial crack*. *Propagation*, merupakan daerah rambatan akhir dengan permukaan yang kasar dengan butir-butir yang kasar (*coarse grains*).

Pada hasil pengamatan struktur mikro diketahui bahwa struktur awal yang terbentuk ketika spesimen belum diberi perlakuan menunjukkan struktur *pearlite* dan *sementite* yang merupakan struktur dari baja *hypereutectoid* (Avner, 1974).

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN



Sedangkan struktur mikro pada *crossbar* yang sesuai standar menunjukkan fasa *martensite* dan terdapat juga *graphite flake* yang merupakan ciri khas dari *grey cast iron*. Dari segi fasa yang terbentuk pada material *crossbar* yang digunakan oleh PT. Semen Indonesia (Persero) Tbk sangat jauh berbeda dari fasa yang seharusnya terbentuk pada material standar *crossbar*. (Subardi, 2011)

Setelah di *hardening* dan di *quench* dengan media pendingin yang berbeda-beda, rata-rata diperoleh struktur mikro berupa karbida Cr, *sementite* dan *pearlite*. Untuk material yang paling keras adalah spesimen *crossbar* H950 OQ struktur mikro yang terbentuk yaitu *martensite* dan *sementite*. Hal ini terjadi dikarenakan adanya pendinginan secara cepat dan temperatur sudah melewati temperatur austenisasi sehingga jika dilakukan pendinginan cepat akan terjadinya perubahan fasa yang pada awalnya *pearlite* dan *sementite* menjadi *martensite* dan *sementite* (Avner, 1974). Untuk spesimen *crossbar* H950 AQ struktur mikro yang terbentuk yaitu *bainite*, *sementite*, dan sedikit Karbida. *Bainite* dan karbida terbentuk karena pendinginan secara normal dengan udara tidak secepat dengan menggunakan oli sehingga terjadi perubahan fasa yang pada awalnya *pearlite* dan *sementite* menjadi *bainite*, *sementite* dan terbentuk sedikit karbida. Untuk spesimen *crossbar* H800AQ dan H800 OQ struktur mikro yang terbentuk yaitu *pearlite*, *karbida*, *sementite*. Untuk hasil pengamatan struktur mikro H850-AQ, H850-OQ, H900-AQ, dan H900-OQ memiliki hasil yang tidak jauh berbeda dengan H800-AQ dan H800-OQ. Hal ini terjadi dikarenakan perlakuan panas pada temperatur 800°C - 900°C belum melewati temperatur austenisasi sehingga fasa *pearlite* masih terdapat namun sedikit dan karbida muncul dikarenakan adanya peralakuan panas. (Suwarno 2005)

Kemudian di *tempering* dengan temperatur 550°C dengan waktu tahan 60 menit rata-rata diperoleh struktur mikro berupa karbida Cr, *sementite*, dan *pearlite*. Untuk material yang paling keras adalah spesimen *crossbar* H950-OQ-T550t1h struktur mikro



yang terbentuk yaitu *tempered martensite* dan *sementite*. Setelah dilakukan *tempering* struktur *martensite* berubah menjadi *tempered martensite*. Hal ini dapat dilihat dari perubahan ukuran *martensite* yang lebih kecil dan lebih banyak. (Mizhar 2011). Untuk spesimen *crossbar* H950-AQ-T550t1h struktur mikro yang terbentuk yaitu *bainite*, *sementite*, dan sedikit Karbida. Setelah dilakukan *tempering* jumlah *bainite* semakin meningkat dan *karbida* semakin sedikit. Untuk spesimen *crossbar* H800-AQ-T550t1h dan H800-OQ-T550t1h struktur mikro yang terbentuk yaitu *pearlite*, *karbida*, dan *sementite*. Untuk hasil pengamatan struktur mikro H850-AQ-T550t1h, H850-OQ-T550t1h, H900-AQ-T550t1h, dan H900-OQ-T550t1h memiliki hasil yang tidak jauh berbeda dengan H800-AQ-T550t1h dan H800-OQ-T550t1h. Hal ini terjadi dikarenakan perlakuan panas pada temperatur 800°C - 900°C belum melewati temperatur austenisasi sehingga fasa *pearlite* masih terdapat namun sedikit dan karbida muncul dikarenakan adanya peralakuan panas. (Suwarno 2005).

Pada hasil uji kekerasan perubahan kekerasan pada daerah yang dekat dari patahan dan jauh dari patahan. Dimana pada daerah yang dekat dengan patahan mengalami kenaikan kekerasan dengan nilai kekerasan rata-rata sebesar 405 BHN di bandingkan daerah yang jauh dari patahan dengan nilai kekerasan rata-rata sebesar 359,75 BHN. Hal ini disebabkan oleh tingginya tegangan yang bekerja pada daerah yang dekat patahan (J. Hou 2011). Berdasarkan uji kekerasan yang dilakukan terjadi perubahan kekerasan pada daerah tegak lurus dengan aliran pendinginan dan sejajar arah aliran pendinginan tidak mengalami banyak perubahan nilai kekerasan. Pada daerah tegak lurus dengan arah aliran pendinginan memiliki kekerasan terendah dekat dengan permukaan yaitu sebesar 325 BHN dan yang terendah jauh dengan permukaan yaitu sebesar 358 BHN. Berdasarkan hasil uji kekerasan tersebut dapat dikatakan bahwa temperatur kerja *crossbar* mempengaruhi kekerasan pada *crossbar*. (Wahyudi 2000)

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

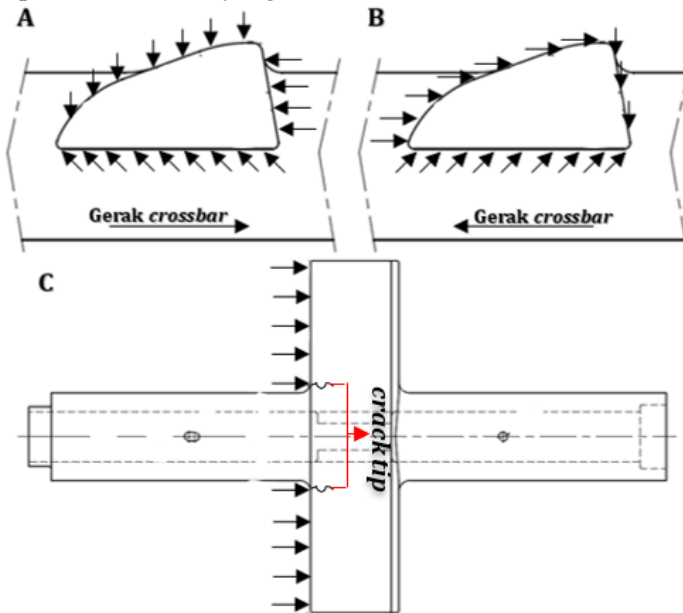


Setelah dilakukan pengamatan struktur mikro pada proses *hardening* dengan variasi temperatur 950°C, 900°C, 850°C dan 800°C. Kemudian dilanjutkan dengan variasi media pendingin menggunakan udara dan oli dilakukan uji kekerasan pada spesimen *crossbar*. Untuk spesimen *crossbar* H950-OQ memiliki kekerasan yang paling tinggi yaitu sebesar 599,67 BHN. Hal ini dikarenakan pada perlakuan panas dengan temperatur 950°C dengan media pendingin oli terbentuk fasa martensit dimana fasa *martensit* memiliki kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan dengan fasa *pearlite*. Untuk spesimen *crossbar* H950-AQ memiliki kekerasan lebih rendah yaitu sebesar 578,67 BHN. Hal ini dikarenakan pada perlakuan panas dengan temperatur 950°C dengan media pendingin udara terbentuk fasa *bainite* dikarenakan pendinginan yang lebih lambat dibandingkan dengan oli sehingga kekerasan yang didapatkan lebih rendah dibandingkan dengan fasa *martensite*. Untuk spesimen *crossbar* H900-AQ, H900-OQ, H850-AQ, H850-OQ, H800-AQ, dan H800-OQ memiliki kekerasan yang tidak jauh beda yaitu sebesar 562 BHN, 580 BHN, 541 BHN, 561,67 BHN, 525,67 BHN, dan 543,33 BHN. Hal ini dikarenakan pada perlakuan panas dengan temperatur 800°C – 900°C dengan media pendingin udara dan oli didapatkan fasa yang tidak jauh berbeda dikarenakan temperatur *hardening* masih dibawah temperatur austenisasi sehingga fasa yang terbentuk adalah *pearlite* dan *sementite*. Perbedaan kekerasan pada spesimen 800°C – 900°C dengan media pendingin udara dan oli dikarenakan adanya pengaruh karbida chromium.

Setelah dilakukan *hardening* dilakukan tempering untuk mengkondisikan kondisi standard pada saat material beroperasi dan didapatkan nilai kekerasan yang paling tinggi pada spesimen yang dihardening dengan temperatur 950°C dengan media pendingin oli sebesar 530,33 BHN, selanjutnya dengan temperatur *hardening* 950°C menggunakan media pendingin udara yaitu 519,33 BHN. Sedangkan untuk kekerasan paling rendah setelah dilakukan tempering yaitu pada spesimen yang di *hardening* dengan temperatur 800°C dengan media pendingin udara yaitu 430



BHN, selanjutnya dengan temperatur hardening 800°C menggunakan media pendingin oli yaitu 440 BHN. Setelah mengalami proses tempering nilai kekerasan dari kedelapan spesimen menurun hal ini dikarenakan *tempering* bertujuan untuk mengembalikan sebagian keuletan/ketangguhan, berakibat turunnya kekerasan, dan melepas tegangan dalam untuk memperoleh keuletan yang lebih baik (Donald S Clark 1962)



Gambar 4.16. Ilustrasi persebaran gaya pada *crossbar* (a) Pada saat mendorong *clinker* (b) Pada saat kembali ke posisi semula (c) Persebaran gaya tampak atas

Mekanisme kegagalan dari *crossbar* dapat ditinjau dari segi desain *crossbar* dan cara kerja dari *crossbar* tersebut. Bagian sayap dari *crossbar* didesain untuk tidak menyentuh bagian *air distribution plate* atau bagian dasar dari *cooling chamber*. Selain ditinjau dari segi desain *crossbar*, mekanisme kegagalan dapat ditinjau dari segi cara kerja *crossbar*. Pada gambar 4.16 dapat

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN



dilihat persebaran gaya pada bagian sayap *crossbar*. Dapat dilihat dari kedua gambar tersebut bahwa kegagalan disebabkan karena *clinker* yang menyisip ke bawah sayap sehingga menyebabkan gaya gesek dan gaya tekan keatas. Pada gambar 4.16 (a) dapat dilihat bahwa bagian dengan luas permukaan yang lebih besar mendorong *clinker* menuju ke arah *hammer crusher*. Hal ini menyebabkan gaya tekan yang berlebih disaat *crossbar* bergerak secara *linear*. Selain itu beban *clinker* pada permukaan *crossbar* menyebabkan gaya tekan yang berlebih (*overload*). Untuk gambar 4.16 (b) dan (c) bagian sayap yang memiliki luas yang lebih kecil bergerak ke posisi awalnya. Bagian yang memiliki luas permukaan lebih kecil ini didesain aeordinamis agar *clinker* tidak terdorong kembali *rotary kiln*. Pada saat gerakan kembali ini, *crossbar* juga mengalami gaya tekan yang berlebih yang diakibatkan oleh pembebanan *clinker* yang lebih besar dibandingkan dengan pembebanan *clinker* pada saat mendorong *clinker*. Akibat dari gaya – gaya yang bekerja pada *crossbar* secara terus menerus, *crossbar* mengalami kegagalan berupa *crack*.



(halaman ini sengaja dikosongkan)



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan serangkaian percobaan yang telah dilakukan ada beberapa kesimpulan mengenai keausan *crossbar* pada *clinker cooler* antara lain sebagai berikut :

1. Faktor yang menyebabkan terjadinya *crack* komponen *crossbar* pada *clinker cooler* yaitu komposisi material yang tidak sesuai, kekerasan material yang nilainya lebih rendah dari kekerasan material standar *crossbar*, dan kinerja *crossbar* pada PT. Semen Indonesia (persero) Tbk.
2. Mekanisme kegagalan dikarenakan adanya beban kombinasi dan gaya gesek sehingga menyebabkan beban tekan dari bawah oleh *clinker* yang menyisip pada rongga antara sayap dan *air distribution plate*, dan beban tekan dari *clinker* yang berlebih sehingga membuat *crack* pada bagian *crossbar* yang memiliki luas permukaan yang kecil sehingga menyebabkan *crossbar* mengalami *crack*.
3. Solusi dari kegagalan ini yaitu dengan memberikan perlakuan panas pada komponen *crossbar* dengan temperatur 950°C dengan pendinginan oli sehingga mendapatkan kekerasan sebesar 599 BHN, setelah itu dilakukan *tempering* untuk mengkondisikan pada temperatur kerja dari *crossbar* sehingga mendapatkan kekerasan sebesar 530 BHN. Perlakuan panas jenis ini dapat meningkatkan kekerasan *crossbar* PT. Semen Indonesia (persero) Tbk. Sehingga memasuki standar kekerasan *crossbar* berdasarkan ASTM A48.

5.2 Saran

1. Pada saat pembelian *crossbar* harus disertakan dengan sertifikat komposisi kimia dan sifat mekanik dari *crossbar*



- dan harus sesuai dengan spesifikasi dari *crossbar* pada umumnya.
2. Menggunakan unit perata *clinker* sesaat setelah *clinker* keluar dari *rotary kiln* agar dapat meratakan beban *clinker* pada *crossbar* dan pendinginan lebih efisien.
 3. Menggunakan produk lain yang sesuai dengan standar *crossbar* dan yang lebih murah serta efisien dalam penggunaannya
 4. Jika *crossbar* tidak memungkinkan diganti dengan jenis material yang lain maka perlu dilakukan proses *heat treatment* pada komponen *crossbar* sebelum dipasang pada *clinker cooler* agar meningkatkan kekerasan dan kekuatan pada *crossbar*.
 5. Pada proses *hardening*, untuk menghasilkan struktur mikro fasa *martensite*, pendinginan cepat dengan oli dan air bisa dilakukan. Selain itu untuk temperatur *hardening* juga perlu ditingkatkan disarankan lebih dari 950°C.

DAFTAR PUSTAKA

- _____. 1998. **ASM Handbook Vol.04 Heat Treatment**. Material Park. Ohio. USA. ASM International.
- _____. 2002. **ASM Handbook Vol.9 Metallographic and Microstructure**. Material Park. Ohio. USA. ASM International.
- _____. 2002. **ASM Handbook Vol.12 Fractography**. Material Park. Ohio. USA. ASM International.
- _____. 2002. **ASM Handbook Vol.19 Fatigue and Fracture**. Material Park. Ohio. USA. ASM International.
- Anwar, Khairil. 2011. **Analisis Perpindahan Panas Grate Cooler Industri Semen**. Palu: Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Tadulako.
- Arain, Attaullah. (Ayooq). 1999. **Heat Treatment and Toughness Behavior of Tool Steels (D2 and H13) for Cutting Blades**.
- Avner, Sidney H. 1974. **Introduction To Physical Metallurgy**. Singapore: McGraw-Hill Book Co.
- Brooks, Charlie and Choudhury, Ashok. 2002. **Failure Analysis of Engineering Materials**. New York: McGraw-Hill.
- Callister, William. 2007. **Material Science and Engineering An Introduction**. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Campbell, F.C. 2008. *Elements of Metallurgy and Engineering*. New York: ASM International.
- Dieter, George E. 1987. **Metalurgi Mekanik**. Jakarta: Erlangga.
- Donald S Clark, Varney R Wilbur. 1962. **Physical Metallurgy for Engineers**. California: Litton Educational Publishing Inc.
- Edahwati, Luluk. 2009. **Alat Industri Kimia**. Surabaya: UPN Press.
- Firdaus, Apriyadi. 2007. **Proses Pembuatan Semen Pada PT. Holcim Indonesia Tbk**. Banten: Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.

- J. Hou, Q.J. Peng, T. Shoji. 2011. **Effects of cold working path on strain concentration, grain boundary microstructure and stress corrosion cracking in Alloy 600.** *Corrosion Science* 2960.
- LI Hong-ying, LI Jun HU Ji-dong, Guang Chen, Xiong-jie Sun. 2013. **Effect of tempering Temperature on Microstructure and Mechanical Properties of AISI 6150 Steel.** Journal Central South University.
- Michael J. Schneider, The Timken Company, and Madhu S. Catterjee, Bodycote. 2013. **Introduction to Surface Hardening of Steels.** USA: ASM International.
- Mizhar, Susri. 2011. **Pengaruh Perbedaan Kondisi Tempering Terhadap Struktur Mikro dan Kekerasan dari Baja AISI 4140.** *Jurnal Dinamis* 23.
- Murtiono, Arief. 2012. **Pengaruh Quenching dan Tempering Terhadap Kekerasan dan Kekuatan Tarik Serta Struktur Mikro Baja Karbon Sedang Untuk Mata Pisau Pemanen Sawit.** Sumatera: Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sumatera Utara.
- Muslim, Khairul. 2008. **Pengaruh Perlakuan Quench Temper dan Spheroidized Anneal Terhadap Sifat Mekanis Baja Perkakas.** 13.
- Nishida, Shin-ichi. 1992. **Faliure Analysis in Engineering Application.** Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Nukman. 2009. **Ketangguhan Beban Impak dan Beban Tarik Maksimum Pada Pelat Baja Berlapis Akibat Quenching and Normalizing.** Palembang: Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya.
- Rina Dwi Yani, Tri Pratomo, Hendro Cahyono. 2008. **Pengaruh Perlakuan Panas Terhadap Struktur Mikro Logam ST 60.** Pontianak: Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Pontianak.
- Rochman Rochiem, Hariyati Purwaningsih, Edwin Setiawan. 2009. **Pengaruh Proses Perlakuan Panas Terhadap**

- Kekerasan dan Struktur Mikro Baja AISI 310 S.** Surabaya: Jurusan Teknik Material dan Metalurgi, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Saito, Tata Surdia & Shinroku. 1975. **Pengetahuan Bahan Teknik.** Jakarta: Pradnya Paramita.
- Setiyana, Budi. 2007. **Analisis Unjuk Kerja Grate Clinker Cooler Pada Proses Produksi Semen.** 20.
- Suwarno, Abdullah Shahab. 2005. **Investigasi Derajat Presipitasi Karbida Krom pada Baja Tahan Karat Austenitik dengan Pengamatan Makro.** *Jurnal Teknik Mesin* 46.
- Tansiswo Siagian, Achmad As'ad Sonief, Pratikto. 2009. **Pengaruh Buka-an Damper Blower Pada Proses Penggilingan Pada Vertical Mill Terhadap Kapasitas Udara Dan Tingkat Kehalusan Semen.**
- Wahyudi, Didik. 2000. **Penelitian Optimasi Temperatur yang Mempengaruhi Kekerasan pada Pembuatan Grinding Ball dengan Cara Hot Rolling.** 97.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN

1. Table 1. Composition Range for Un-Alloyed Cast Iron

Table 1. Composition Range for Un-Alloyed Cast Irons

Iron Family	Carbon	Silicon	Manganese	Sulfur	Phosphorus
Gray	2.5-4.2	1.0-3.0	0.15-1.0	0.02-0.25	0.02-1.0
Ductile	3.0-4.0	1.8-3.0	0.1-1.0	0.01-0.03	0.01-0.1
CGI	2.5-4.0	1.5-3.0	0.10-1.0	0.01-0.03	0.01-0.1
Malleable	2.2-2.8	1.2-1.9	0.15-1.2	0.02-0.2	0.02-0.2
White	1.8-3.6	0.5-2.0	0.15-0.8	0.02-0.2	0.02-0.2

2. Table 3. Property Comparisons for Gray Iron Classes

Table 3. Property Comparisons for Gray Iron Classes

Property	Class 25 (as-cast)	Class 30 (as-cast)	Class 30 (annealed)	Class 35 (as-cast)	Class 40 (as-cast)
Brinell Hardness	187	207	109	212	235
Tensile Strength	29.9 ksi (206 MPa)	33.7 ksi (232 MPa)	20.6 ksi (142 MPa)	34.8 ksi (240 MPa)	41.9 ksi (289 MPa)
Modulus of Elasticity	16.6 Msi (114 GPa)	17.0 Msi (117 GPa)	14.5 Msi (100 GPa)	18.0 Msi (124 GPa)	18.2 Msi (126 GPa)
Tensile Poisson's Ratio	0.29	0.19	0.21	0.22	0.24
Compression Poisson's Ratio	0.27	0.28	0.26	0.28	0.23
Compression-to-Tensile Strength Ratio	3.68	3.84	4.05	3.63	3.71

3. Table 3. Hardness Ranges for Gray Cast Iron

Table 3. Hardness Ranges for Gray Cast Iron

Type of Gray Iron	Matrix Microstructure Around Flake Graphite	Brinell Hardness (BHN)
Soft-Annealed	All Ferrite	110-140
Ordinary	Pearlite and Ferrite	140-200
Higher Strength	Fine Pearlite	200-270
Alloyed-Arcicular	Bainite	260-350
Austenitic (Ni-Resist)	Austenite	140-160
Heat Treat Hardened	Martensite	480-550
Hardened and Tempered	Tempered Martensite	250-450
Chilled (White Iron)	Pearlite and Carbides	400-500

4. Hasil Uji OES



**BADAN PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN INDUSTRI
BALAI RISET DAN STANDARDISASI INDUSTRI SURABAYA
LABORATORIUM PENGUJIAN DAN KALIBRASI
BARISTAND INDUSTRI SURABAYA**

Jl. Jagir Wonokromo No. 360 Surabaya (60244), Telp. (031) 8410054, Fax. (031) 8410480
<http://baristandsurabaya.kemenperin.go.id/>

Nomor Analisa : P 5576 s/d P 5578
Jenis Sampel : Besi Tuang
Kode : A, B, C

No	Parameter Uji Komposisi Kimia Logam	Satuan	Hasil Uji			Methoda uji
			P 5576 (A)	P 5577 (B)	P 5578 (C)	
1	Si	%	0,37379	2,4849	0,61983	JIS G 1253 : 2002 Cara uji komposisi kimia
2	Mn	%	0,77582	0,93132	2,0322	
3	P	%	0,01986	0,06462	0,05978	
4	S	%	0,00606	0,02336	0,01116	
5	Cu	%	0,03701	0,56583	0,15006	
6	Ni	%	0,39966	3,5939	7,6548	
7	Cr	%	1,9148	16,344	13,387	
8	Mo	%	0,22922	0,33403	0,22436	
9	Al	%	0,05568	0,10638	0,01166	
10	Carbon	%	0,59650	1,1742	0,02916	

Catatan :

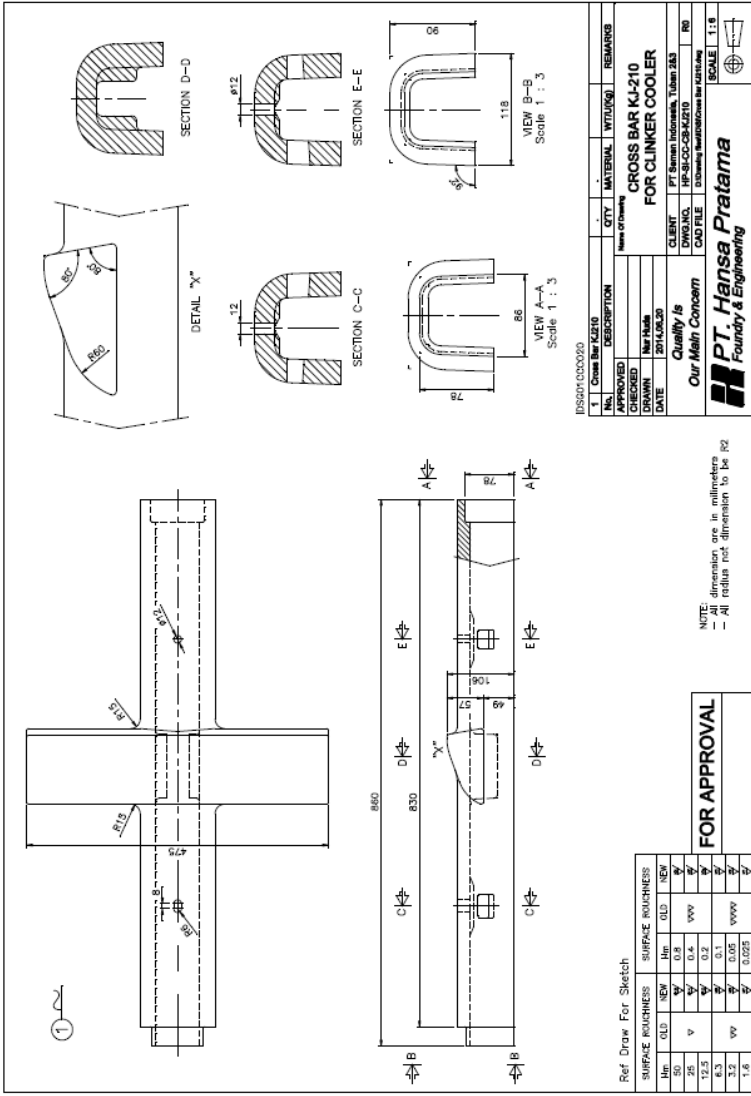
- Sampel diuji sesuai permintaan.
- Sampel diuji dengan alat Optical Emission Spectrometer



Halaman 2 dari 2
Page 2 of 2

Perhatian :
Laporan Hasil Uji hanya berlaku untuk contoh diatas
Laporan Hasil Uji ini tidak boleh digandakan
KodeDok : FM – 7.09.02 1/0

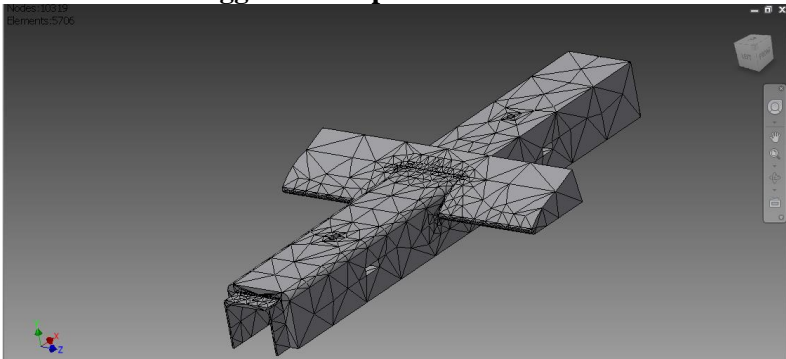
5. Desain Crossbar PT. Semen Indonesia Tbk.



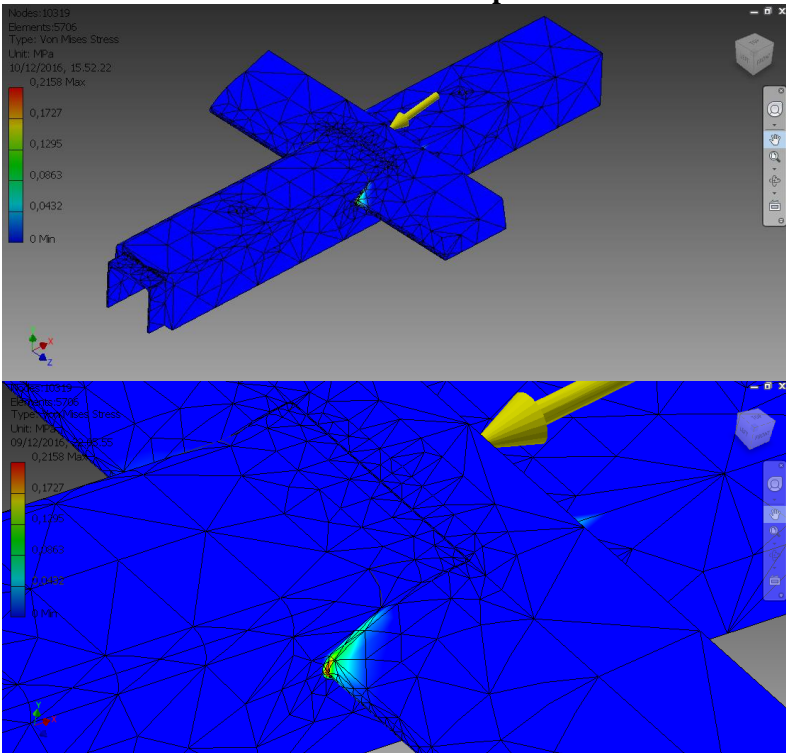
XXX

[illegible]

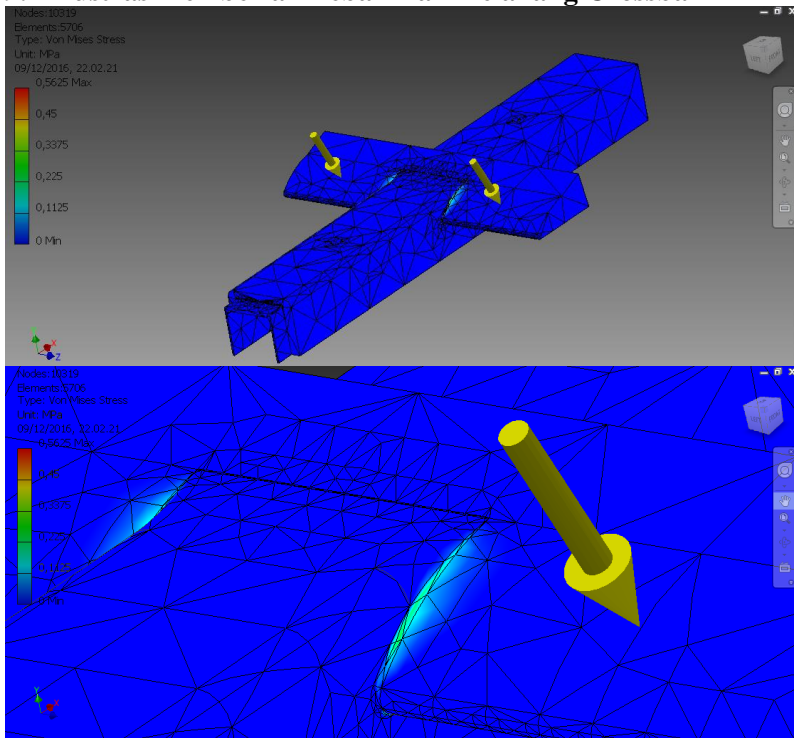
7. Crosbar Menggunakan Aplikasi Autodesk Inventor



8. Ilustrasi Pemberian Beban Dari Depan Crossbar



9. Ilustrasi Pemberian Beban Dari Belakang Crossbar



UCAPAN TERIMA KASIH

Pada pengerjaan tugas akhir ini penulis banyak mendapat bantuan dari berbagai pihak, pada kesempatan ini penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada:

1. Allah SWT karena dengan rahmat dan kuasa-Nya penulis dapat menyelesaikan laporan Tugas Akhir ini dengan baik dan tepat waktu.
2. Ayah, Ibu, Kakak, dan Adik-adik tercinta, Bapak Gatot Lesmono, Ibu Wiwin Sri Wijayati, Kakak Wiga Cynthia Devie, dan Winda Glea Cynthari serta seluruh keluarga yang telah memberikan banyak doa, dukungan, semangat, cinta kasih, motivasi, dan inspirasi.
3. Ir. Rochman Rochiem, M,Sc. dan Alvian Toto Wibisono ST., MT. selaku dosen pembimbing Tugas Akhir penulis yang telah membimbing dan memberikan banyak ilmu selama pengerjaan tugas akhir ini.
4. Pak Didiet dan Pak Ginanjar selaku pembimbing dari PT. Semen Indonesia Tbk. yang telah membimbing dan memberikan banyak ilmu selama pengerjaan tugas akhir ini.
5. Dr. Agung Purniawan, ST., M,Eng selaku Ketua Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI – ITS.
6. Dr. Eng. Hosta Ardhyanta ST., M.Sc. selaku Koordinator Tugas Akhir Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS.
7. Budi Agung Kurniawan ST., M.Sc. selaku dosen wali yang sangat mengayomi selama penulis menjalani pendidikan di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi.
8. Seluruh dosen dan karyawan Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS yang telah membimbing penulis hingga terciptanya laporan ini.
9. Sahabat terbaik penulis yaitu Para Sayap yang beranggotakan Gentong, Aul, Dio, Dony, Andika, Daru, Ridho, Kemplo, Panji, Didit, Reggy, Ikiw, dan Yudha yang telah memberikan semangat dan energi positif selama penulis menjadi mahasiswa di JTMM FTI-ITS.

10. Teman sekamar penulis Panji Harga Susila dan M. Ridho Azhari yang selalu ada untuk berbagi suka dan duka selama penulis menjadi mahasiswa di JTMM FTI-ITS.
11. Yudha Prakasa Putra Ramadhan dan Dony Prasetya, teman-teman satu tim tugas akhir di PT. Semen Indonesia yang telah memberikan bantuan, semangat, dan cerita selama pengerjaan tugas akhir ini.
12. Retno Asih Mutianingrum yang selalu memberikan kesan baik dan semangat positif kepada penulis.
13. Teman-teman seperjuangan MT15 yang memberikan banyak cerita dalam kehidupan penulis.
14. Dan Seluruh pihak yang telah memberikan partisipasi dalam Tugas Akhir ini.
15. Serta seluruh pihak yang belum bisa dituliskan satu per satu oleh penulis. Terimakasih atas dukungan dan bantuan teman-teman sekalian.

BIODATA PENULIS



Penulis lahir di Kota Surabaya pada tanggal 27 September 1995. Penulis merupakan anak kedua dari tiga bersaudara pasangan Gatot Lesmono dan Wiwin Sri Wijayati. Penulis telah menempuh pendidikan formal di SDN Kranggan 3 Mojokerto, SMP Taruna Nusa Harapan Mojokerto, dan SMAN 1 Sooko Kabupaten Mojokerto. Setelah lulus dari jenjang SMA pada tahun 2013, penulis melanjutkan pendidikan ke jenjang perguruan tinggi di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Semasa kuliah penulis aktif mengikuti kegiatan organisasi, pelatihan, dan seminar. Penulis pernah menjabat sebagai staff Kementerian Kebijakan Kampus BEM ITS 2014/2015. Selain itu penulis sempat aktif sebagai Asisten Laboratorium Fisika Material dan Laboratorium Korosi dan Analisa Kegagalan di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi.

Penulis memiliki pengalaman kerja praktek di PT. Gunanusa Utama Fabricators Indonesia pada bulan Juni 2016. Selama kerja praktek penulis mendalami topik terkait “Studi Aplikasi Pengelasan dan Pembuatan WPS Dengan Acuan Code AWS D1.1 Untuk Proses Pengelasan Padeye And Trunnion Pada Jacket PHE-24 di PT. Gunanusa Utama Fabricators Indonesia.

Tugas akhir yang diambil penulis dalam bidang Korosi dan Analisa Kegagalan berjudul “Analisis Pengaruh Variasi Temperatur dan Media Pendingin Proses Hardening Pada Sifat Kekerasan Crossbar Sebagai Solusi Kegagalan Crossbar PT. Semen Indonesia Tbk.”. *Email: galecraka@gmail.com*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)